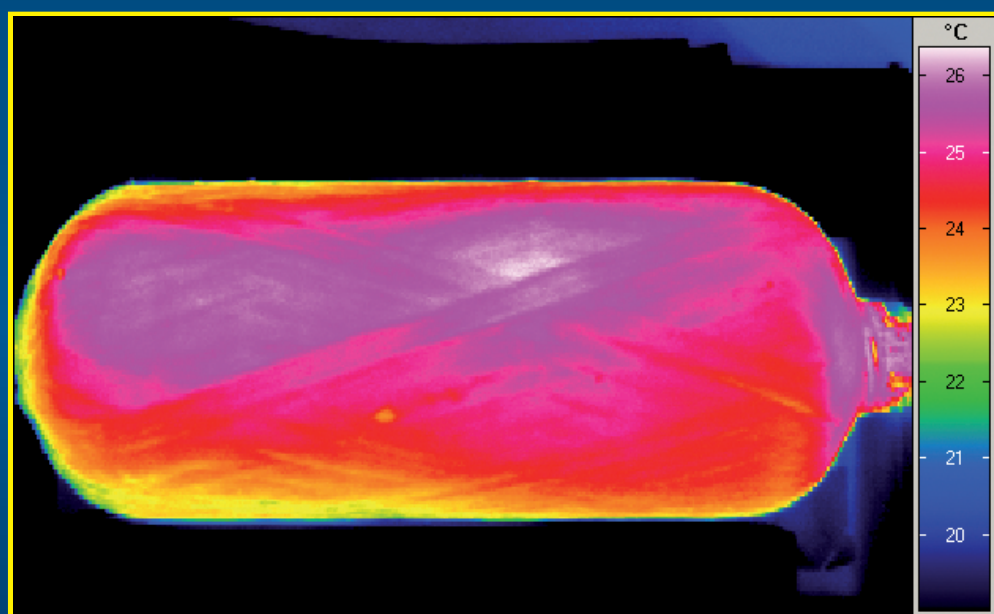


Wojciech Błażejowski

KOMPOZYTOWE ZBIORNIKI WYSOKOCIŚNIENIOWE WZMOCNIONE WŁÓKNAMI WEDŁUG WZORÓW MOZAIKOWYCH



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Wojciech Błażejowski

**Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe
wzmocnione włóknami
według wzorów mozaikowych**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013**

Praca częściowo finansowana z projektu badawczego MEiSW, nr N N508 477534, pt. *Metodyka doboru struktury kompozytowego opłotu nośnego butli wytwarzanych metod, nawijania, przeznaczonych na wysoko sprężone paliwa gazowe* (nr 7 T08D 017 10, nr umowy 294-T08-96-10).

Recenzenci

Wacław Kasprzak

Wacław Królikowski

Opracowanie redakcyjne i korekta

Hanna Jurek

Projekt okładki

Marcin Zawadzki

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-777-1

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 601/2013.

Spis treści

Wykaz oznaczeń	5
1. Wprowadzenie	7
1.1. Badania komercyjnych zbiorników kompozytowych	10
1.2. Sformułowanie problemu rozwiązanego w pracy	14
1.3. Cel pracy	16
1.4. Tezy pracy	16
2. Użytkowanie wysoko sprężonych paliw gazowych – CNG i CH₂	17
2.1. Instalacje zasilania wysoko sprężonym metanem i wodorem	19
2.2. Istota problemu magazynowania wysoko sprężonych paliw gazowych w pojazdach	19
2.3. Zbiorniki wysokociśnieniowe – typy konstrukcji	20
2.4. Wymagania stawiane zbiornikom kompozytowym	22
3. Materiały kompozytowe wzmocnione włóknem ciągłym	25
3.1. Włókna wzmacniające ścianki nośne zbiorników	26
3.2. Wytwarzanie materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym w kontekście zbiorników kompozytowych	28
3.3. Inne metody wytwarzania butli kompozytowych	30
3.4. Przebieg niszczenia materiału kompozytowego w czasie obciążania zbiornika	33
3.5. Specyfika wytwarzania zbiorników kompozytowych	33
3.6. Struktury ścianek nośnych zbiorników kompozytowych	34
3.7. Wykładziny wewnętrzne (linery) zbiorników kompozytowych	35
4. Projektowanie wzorów mozaikowych, analiza geometrii nawijania	37
4.1. Oprogramowania komercyjne na przykładzie CADWIND	38
4.2. Metoda tablicowa analizy nawijania	42
4.2.1. Charakterystyka parametrów nawijania	42
4.2.2. Opis metody tablicowej. Nawijanie cylindrów	46
4.2.3. Dyskusja nad wynikami	48
4.2.4. Nawijanie butli	56
4.2.5. Sposoby modyfikacji nawijanych struktur kompozytowych	59
4.2.6. Program komputerowy do wyznaczania wzorów mozaikowych	61
4.2.7. Podsumowanie analizy geometrii nawijania za pomocą metody ta- blicowej	62

4.2.8. Kinetyka powstawania przeplotów	63
4.2.9. Charakterystyka wzoru mozaikowego N_r1	66
4.2.10. Charakterystyka wzorów mozaikowych w porównaniu do N_r1	68
5. Przegląd literatury	69
5.1. Literaturowe przykłady badań wzorów mozaikowych	69
5.2. Przykłady modelowania wzmocnień według wzorów mozaikowych	78
5.3. Badania własne wzorów mozaikowych	83
5.4. Podsumowanie przeglądu literatury i własnych badań pilotażowych butli i rur	98
6. Badania butli kompozytowych wzmocnionych według różnych wzorów mozaikowych	99
6.1. Charakterystyka i wykonanie obiektów badań	101
6.2. Badania zmęczeniowe butli	105
6.3. Analiza uzyskanych wyników	106
6.4. Badania niszczące butli	111
6.5. Analiza uzyskanych wyników	113
6.6. Badania zmęczeniowe według SPOSOBU III z wykorzystaniem termowizji	115
6.7. Badania statyczne według SPOSOBU III z użyciem EMWP	119
6.8. Pomiary przemieszczeń powierzchni butli z wzorem mozaikowym za pomocą skanera światła strukturalnego	121
6.9. Badania statyczne butli z użyciem szerografii	124
6.10. Zaproponowane modele obliczeniowe – podstawowe problemy	126
7. Podsumowanie i wnioski	143
7.1. Podsumowanie	143
7.2. Wnioski	146
Bibliografia	147
Wykaz norm	162
Wykaz pojęć, terminów angielskich i skrótów	165
Streszczenie w języku angielskim	171

Wykaz oznaczeń

a_i	– współczynnik reszty skoku nawijania dla wzoru mozaikowego o numerze i , $a_i = \frac{N_r i}{Z}$,
D	– średnica zewnętrzna elementu nawijanego,
d	– średnica rdzenia (wewnętrzna elementu nawijanego),
E	– moduł sprężystości wzdłużnej Younga,
E_m	– tzw. pojemność przechowywanej energii na jednostkę masy (ang. <i>energy storage capacity per unit mass</i>), $\frac{P_B \cdot V}{W_m}$ [MPa/kg],
e	– szerokość wiązki nawijanej złożonej z kilku rowingów,
e_x	– szerokość wiązki w płaszczyźnie przekroju prostopadłego do osi rdzenia (rys. 4.7),
G	– moduł sprężystości poprzecznej,
h	– grubość wiązki,
k	– liczba skoków, $k \in N$,
L	– obliczeniowa długość butli,
Lp	– liczba przepłotów,
l	– droga przebyta przez suport,
$\bar{l}$	– średnia długość wiązki nieprzeplecionej wyrażana w szerokościach (wielokrotnościach) wiązki e ,
l^T	– długość części walcowej elementu nawijanego z tolerancją T ,
M	– moment skręcający próbkę rurową,
$N_r(i)$	– wzór mozaikowy o numerze i ,
Np	– numer w szeregu wzorów według liczby przepłotów (1 – pierwszy w szeregu będzie zawsze wzór N_r1),
$Np_{\max}$	– największy numer z szeregu wzorów według przepłotów (zawsze będzie to wzór mozaikowy N_r2 z rozpatrywanej tablicy T),
n	– liczba podziału obwodu rdzenia elementu nawijanego ($n \in N$, rys. 4.7),
P	– ciśnienie cieczy,
P_B	– ciśnienie niszczące (ang. <i>burst pressure</i>) butli,
P_T	– ciśnienie próbne (ang. <i>test pressure</i>) butli,
P_W	– dopuszczalne ciśnienie pracy (ang. <i>work pressure</i>) butli,
p	– parametr przeskoku, długość łuku o promieniu $r = d/2$, którego początkiem jest punkt przejścia wiązki z powierzchni walcowej na denni-

- cę, a końcem jest punkt przejścia z dennicy na powierzchnię walcową (rys. 4.16, s. 57),
- s – skok nawijania – jest to droga, jaką przebędzie suport przy pełnym obrocie rdzenia,
- T – numer tablicy nawijania w metodzie tablicowej,
- t – czas,
- V – objętość butli,
- V_p – udział pustek (pęcherzy powietrza i porów) w materiale ES,
- v – prędkość ruchu suportu,
- v_o – prędkość obwodowa rdzenia,
- W – wytrzymałość właściwa [196], przejście włókna w algorytmie programu CADWIND ($W = e_x$),
- W_m – masa pustej butli,
- W_r – wytrzymałość kompozytu na rozciąganie,
- Z – liczba nawrotów suportu (nawroty z prawej i lewej strony nawijarki)
 $Z = 2n = N_r/a$,
- α – kąt nawijania,
- ε – odkształcenie,
- ε_{CDS} – odkształcenie odpowiadające stanowi nasycenia pęknięciami poprzecznych warstw,
- ν – współczynnik Poissona,
- ρ – gęstość,
- $\sigma_{1,2,3}$ – naprężenia główne,
- σ_f – naprężenie w kierunku nawiniętych włókien,
- σ_o – naprężenie obwodowe w części walcowej,
- σ_w – naprężenie wzdłużne w części walcowej,
- τ – naprężenia styczne,
- ϕ – kąt skręcenia próbki rurowej w stopniach oraz kąt parametru przeskoku p w radianach,
- ω – prędkość kątowa rdzenia.

1. Wprowadzenie

Gromadzenie gazów pod wysokim ciśnieniem od dawna jest i pozostanie zagadnieniem aktualnym. Służące temu celowi zbiorniki kompozytowe są przedmiotem zainteresowania wielu konstruktorów, badaczy, eksploatorów pojazdów i innych urządzeń, których działanie wymaga użycia wysoko sprężonych gazów, a zwłaszcza paliw gazowych. Obecne tendencje w budowie zbiorników wysokociśnieniowych, szczególnie w konstrukcjach mobilnych, przenośnych itp., zmierzają do redukcji ich masy z zachowaniem dużych parametrów eksploatacyjnych, w tym głównie bezpieczeństwa. Aktualnie na rynku można spotkać około 700 rodzajów handlowych gazowych butli kompozytowych (różniących się zastosowaniem, konstrukcją, w tym strukturą ścianki nośnej, technologią wykonania itp.). Jest to związane przede wszystkim z dynamicznym rozwojem na świecie wykorzystania wysoko sprężonych paliw gazowych do zasilania silników pojazdów, w tym autobusów, ciężarówek, wózków widłowych, pojazdów szynowych, a nawet silników transportu wodnego i lotniczego. Ciśnieniowe butle kompozytowe są również wykorzystywane w innych dziedzinach, takich jak: służby ratownicze, wojsko, loty kosmiczne, magazynowanie sprężonego powietrza w urządzeniach mobilnych i wielu innych. Z tej obszernej grupy butli kompozytowych najwyższe wymagania muszą spełniać zbiorniki przeznaczone do magazynowania sprężonego gazu ziemnego CNG (*Compressed Natural Gas*) i sprężonego wodoru CH_2 (*Compressed Hydrogen*) w pojazdach. Należy nadmienić, że standardy dotyczące zbiorników CH_2 na ciśnienia pracy do 350 barów oraz do 700 barów powstały później niż CNG. Z tego powodu były one kopiowane z wymogów przeznaczonych dla CNG. Oznacza to, że są bardzo podobne. Techniki wytwarzania butli do CNG zostały już opanowane, nie stanowią tajemnic dla ich producentów. Obecnie na świecie można znaleźć kilkanaście firm, które produkują kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe z homologacją na CNG, między innymi: Composite Aquitaine, Ulit, EDO Corporation, Lincoln Composites, Raufoss, MAN Technologie, Xperion, Luxfer, Rutgers, Scott, Structural, Faber, Quantum, Dynetek. Dwie ostatnie mają w swojej ofercie butle sprężonego paliwa wodorowego do zasilania pojazdów z homologacją do 350 barów. Już od kilku lat trwają na świecie prace nad wytworzeniem butli z homologacją na 700 barów. Firmy chwalą się obiecującymi prototypami, np. butle wytworzone w ramach programu StorHy [189] (w którego pracach autor uczestniczył) oraz innych programów, np. związanych z amerykańską firmą Quantum. Jak wspomniano, butle wodorowe z homologacją do zastosowań

w przemyśle motoryzacyjnym dla ciśnienia pracy 700 barów dopiero wchodzi na rynek (Lincoln Composites, Quantum, Ulit, Hexagon, Faber), a już można znaleźć wzmianki w Internecie o uruchamianiu projektów badawczych związanych z firmą Quantum, których celem jest wytworzenie bezpiecznej butli CH₂ z homologacją na 1050 barów.

Z doświadczenia autora, zdobytego podczas udziału w programach także europejskich (StorHy, InGAS, HyComp i HyCube – [130, 131, 134, 189]), wynika, że zbiorniki są najistotniejszym elementem w całym układzie zasilania pojazdu gazem CNG i CH₂. Obecnie wprowadzane są na rynek tzw. zbiorniki **typu 4 nowej generacji**, tzn. zbiorniki kompozytowe przeznaczone do magazynowania wodoru pod ciśnieniem pracy 700 barów i wytrzymującym ciśnienie rozrywania powyżej 1645 barów dla oplotu z włókna węglowego (2560 barów dla włókna szklanego). Budowa zbiornika typu 4 nowej generacji jest związana z wykorzystaniem wysokomodułowych włókien węglowych na oplot nośny oraz wysokiej jakości tworzyw sztucznych na tzw. liner (dętkę) zapewniający szczelność.

Dla zbiorników CNG pierwszej, drugiej i trzeciej generacji (typ 1–3) znana jest procedura projektowania i techniki wykonania. Dla producentów renomowanych firm zbiorniki typu 1–3 nie stanowią tajemnic, jednak projektowanie i wytwarzanie zbiorników typu 4 nowej generacji – do 700 barów – to inne procedury projektowe oraz zaawansowane techniki wytwarzania. Korzystanie z doświadczeń projektowych zdobytych na zbiornikach CNG i wodorowych do 350 barów, które prowadzą do pogrubienia ścianki w celu magazynowania paliw przy ciśnieniu 700 barów, nie sprawdza się. Zespoły badawcze producentów zbiorników stosują najlepsze materiały, mimo to zbiorników typu 4 nowej generacji jeszcze na rynku nie ma. Jedno z rozwiązań jest związane z oczekiwaniem na jeszcze lepszy materiał, inne to dalsze poszukiwania w technologii, np. zastosowanie syciw termoplastycznych. Według autora, jedną z dróg jest dobór parametrów nawijania związanych ze stosowaniem najkorzystniejszych wzorów mozaikowych i uzyskanie oplotu nośnego, w którym będzie zapewniona najlepsza praca wiązek włókien wzmacniających. Dodatkowo konstrukcję zbiornika typu 4 nowej generacji komplikuje problem łatwego przenikania, np. sprężonego wodoru przez ścianki zbiornika i stąd konieczność stosowania w konstrukcji materiału barierowego hamującego ten proces. Zagadnienie przenikania gazu przez ściankę zbiornika kompozytowego nie będzie poruszane w tej pracy.

W tym rozdziale omawia się, między innymi, pełną treść pracy po to, aby ułatwić czytelnikowi jej studiowanie.

W zakres zadań związanych z analizą wytrzymałościową wyrobów nawijanych krzyżowo powinno wchodzić rozwiązanie problemu doboru wzoru mozaikowego. Dobór optymalnego kąta nawijania, parametrów geometrycznych wiązki, materiałów itp. nie wyczerpuje możliwości zwiększania wytrzymałości kompozytu nawijanego krzyżowo. Wzajemne ułożenie wiązek, rozmieszczenie przeplotów [29] itd. może przyczynić się do zwiększenia nośności konstrukcji nawijanej.

Problem doboru wzoru mozaikowego można ocenić jedynie eksperymentalnie, co wymaga wytworzenia nawijanych elementów kompozytowych z różnymi wzorami mozaikowymi z zachowaniem niezmiennych (stałych) i innych parametrów nawijania, takich jak: kąt nawijania, udziały składników, wymiary próbek itd. Takie działania opisano w rozdziale 6 tej pracy. Do oceny porównawczej nośności butli wzmocnionych włóknem według wzorów mozaikowych zaproponowano następujące metody badawcze, których wykorzystanie przedstawiono szerzej w opublikowanych pracach z udziałem autora wymienionych poniżej:

- Obserwacje mikroskopowe wypolerowanych powierzchni przekroju próbek, do badania zwiększonych udziałów żywicy w przepłotach, pęknięć, sfałowań i innych niejednorodności w porównaniu do obszarów nieprzeplecionych. Obraz wypolerowanej powierzchni bocznej próbki, obserwowany pod mikroskopem optycznym lub elektronowym, często może wyjaśnić mechanizm powstawania uszkodzeń. Pewne cechy charakterystyczne siatki pęknięć widoczne pod mikroskopem mogą umożliwić ustalenie przyczyn powstawania i rozwoju uszkodzenia, będącego źródłem zniszczenia elementu nawijanego [77, 83].
- Emisję akustyczną (EA) do porównania próbek różniących się wzorami mozaikowymi [18, 19, 21, 23, 66, 81].
- Wyznaczanie przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej lub interferometrycznej warstwy powierzchniowej w celu zaobserwowania stanu przemieszczeń wiązek włókna na powierzchniach badanych próbek z różnymi wzorami mozaikowymi [25, 26, 71].
- Metodę ultradźwiękową do porównania tłumienia sygnału ultradźwiękowego przez zastosowanie wzorów z większą liczbą przepłotów z wzorami o ich mniejszej liczbie [18, 19].
- Pomiary odkształceń z wykorzystaniem włókien światłowodowych jako różnego typu czujników odkształceń o małych rozmiarach, tzw. bazy pomiarowej w celu zaobserwowania różnic w odkształceniach charakterystycznych miejsc i obszarów znajdujących się w badanych wzorach mozaikowych [14, 37, 39, 47, 55, 63, 75, 113, 114, 127, 129, 177, 179].
- Termografię [68, 72] do pomiaru rozkładu temperatur na powierzchni opłotów nośnych z różnymi wzorami mozaikowymi w czasie badań zmęczeniowych. Wiązki bardziej wyteżone przy cyklicznych obciążeniach powodują wzrost temperatury w wyniku powstałych cyklicznych odkształceń.
- Metodę szerografii (s. 77), która umożliwia pomiar gradientu przemieszczenia, a nie samego przemieszczenia, jak na przykład w innych metodach optycznych (ESPI czy holografia) [82].
- Technikę laserową do pomiaru przemieszczeń w wykonanych materiałach z wzorami mozaikowymi znajdujących się pod obciążeniem. Dokonano pomiaru w ruchu obrotowym powierzchni próbek z różnymi wzorami mozaikowymi z użyciem skanera światła strukturalnego oraz laserowego czujnika położenia [69, 140].

W pracy autor wykorzystywał większość z wymienionych metod oraz inne techniki uzupełniające wymienione w dalszej części pracy.

1.1. Badania komercyjnych zbiorników kompozytowych

Przedmiotem szczególnego zainteresowania autora było zbadanie, czy wytwórcy zbiorników kompozytowych stosują szczególne wzory mozaikowe lub ich sekwencje w swoich wyrobach. Ponieważ autor miał dostęp do takich zbiorników, więc przeprowadzono badania, których wyniki opublikowano w pracy [83].

Obiektami badań były wysokociśnieniowe zbiorniki kompozytowe typu 3 i 4 przeznaczone do magazynowania w pojazdach sprężonego metanu i wodoru pod ciśnieniem 200–700 barów, ze wzmocnieniem węglowym i hybrydowym. Łącznie zbadano 9 różnych zbiorników typu 3 i 4 z pełnym opłotem (ang. COPV). Przeprowadzono badania mikroskopowe zglądów, aby ocenić zawartość pęcherzy powietrza i udziałów składników oraz przeprowadzić ocenę udziału składników metodami kalcynowania i oznaczenia gęstości kompozytu przez szacowanie masy. Wszystkie wymienione zbiorniki charakteryzowały się warstwową budową ścianki. Warstwy niezawierające wzorów mozaikowych, np. obwodowe, nie były analizowane. Badane zbiorniki porównano ze sobą na podstawie wyznaczonego współczynnika E_m tzw. pojemności przechowywanej energii na jednostkę masy. Wartości E_m obliczono z poniższej zależności i zamieszczono w tabeli 1.1:

$$E_m = \frac{P_B \cdot V}{W_m}, [\text{MPa l/kg}] \quad (1.1)$$

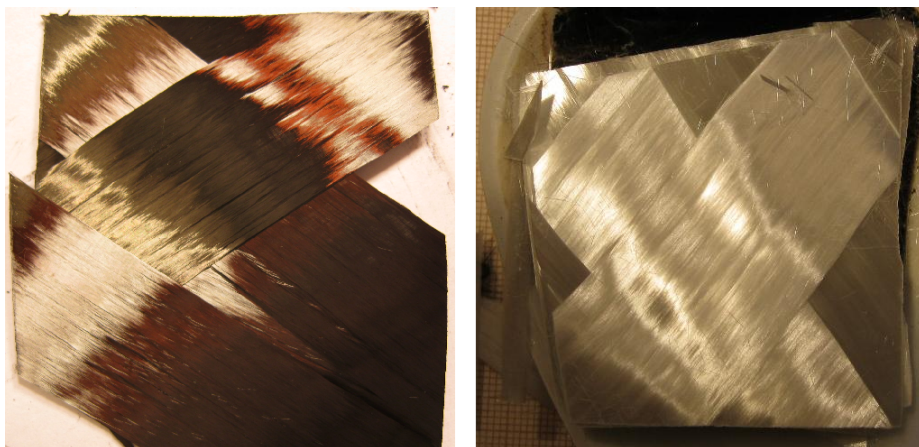
gdzie: P_B – ciśnienie niszczące butli, V – objętość butli, W_m – masa pustej butli.

Tabela 1.1. Zestawienie obliczonych wartości E_m , tzw. pojemności przechowywanej energii na jednostkę masy badanych zbiorników komercyjnych

Oznaczenie zbiornika	A	B	C	D	E	F	G	H	I
E_m [MPa l/kg]	108	110	124	132	139	149	154	173	179

Wyznaczone współczynniki E_m badanych butli mieszczą się w przedziale 108–179 MPa l/kg. Wyznaczone wartości świadczą o wysokiej klasie obiektów badanych oraz opłotów kompozytowych. Z przedstawionego zestawienia współczynników E_m nie wynika podział na typ 3 i 4 oraz przyjęte ciśnienia pracy. Według tego kryterium zbiorniki są porównywalne.

Wykonano zdjęcia mikroskopowe wzorów mozaikowych w warstwach krzyżowych o powiększeniu 50×, a następnie wykorzystywano je do wyznaczenia udziałów włókna, żywicy i pustek powietrznych. Jednym z niekorzystnych zjawisk, jakie zachodzą w czasie wytwarzania butli technologią nawijania na mokro, jest wytwarzanie w powstałym materiale znacznej ilości pęcherzy powietrznych, które



Rys. 1.1. Widok przykładowych próbek
– węglowej i szklanej (hybrydowej) po kalcynowaniu

są traktowane za wadę materiałową. Procentowy udział pustek porównywano do skali podanej przez Pursłowa [10, 77]. Próbki cechowały się nadmierną porowatością w granicach od 4 do nawet 10%, klasyfikowaną przez Pursłowa jako przeciętna i niska [167]. Na podstawie obrazów mikroskopowych określano także udziały włókna i żywicy w warstwach krzyżowych. Udziały składników kompozytu określano także dwoma innymi metodami: kalcynowania (wyżarzania) według normy [228] oraz z oznaczenia gęstości kompozytu. Kalcynowanie przeprowadzano w dwóch etapach. W pierwszym etapie tygiel wraz z próbką podgrzewano na palniku gazowym do temperatury zapłonu żywicy. Po jej samoistnym wygaszeniu w drugim etapie kalcynowania umieszczano tygiel wraz z próbką w nagrzanym wcześniej do temperatury 625 °C piecu mufowym i wyżarzano do uzyskania stabilnej masy. Czas przebywania w piecu zależny był od wielkości próbki, zazwyczaj wynosił około 2,5 h. Przykładowe próbki po kalcynowaniu przedstawiono na rysunku 1.1. Po tak przeprowadzonym badaniu wyznaczano udziały składników materiału. Udział objętościowy włókien w badanym materiale kompozytowym utrzymywał się w zakresie 51–68%.

Wzory mozaikowe określano, wykorzystując zasady metody tablicowej opisane w podrozdziale 4.2 oraz w [28, 35, 48, 53, 59, 64, 72]. W tym celu analizowano wyniki obserwacji mikroskopowych oraz materiał uzyskany po kalcynowaniu. Wykorzystując takie dane, jak: szerokość wiązki, kąt ułożenia, występowanie przepłotów, obwód zbiornika itp. wyznaczano prawdopodobne miejsce wystąpienia charakterystycznych cech geometrycznych badanego wzoru mozaikowego. Pobierano w tych miejscach próbki o wymiarach około 100×100 oraz większych w zależności od potrzeby. Następnie kalcynowano dwuetapowo według wcześniejszego opisu. W celu lepszego i szybszego wyżarzania żywicy, ułatwienia wychodzenia



Rys. 1.2. Widok przykładowej dużej próbki po pierwszym etapie kalcynowania na palniku gazowym. Widoczne są otwory oraz możliwość wstępnego rozwarstwienia próbki

z wnętrza próbki produktów lotnych oraz lepszego pozycjonowania charakterystycznych obszarów wzorów mozaikowych w próbkach wiercono otwory średnicy 3 mm. Na rysunku 1.2 przedstawiono widok przykładowej próbki po pierwszym etapie kalcynowania. Po wyżarzeniu ściągano kolejno ułożone w strukturze wiązki włókna. Na bieżąco prowadzono dokumentację fotograficzną. Zaobserwowane charakterystyczne miejsca struktur porównywano z rysunkami w katalogu wzorów mozaikowych zamieszczonym w załączniku do [28].

W tabeli 1.2 przedstawiono znalezione i opisane wzory mozaikowe, oznaczając je zgodnie z zasadami metody tablicowej, tzn. numer tablicy/wzór mozaikowy o numerze i ($T/N_r(i)$). Numer tablicy oznacza także liczbę wiązek na obwodzie części walcowej butli, a numer wzoru mozaikowego $N_r(i)$ oznacza także przeskok kolejnych wiązek „zmierzających” do zapełnienia obwodu części walcowej zbiornika. Na rysunku 4.23 przedstawiono wzór mozaikowy N_{r1} z tablicy $T11-11/1$ (11 podziałów obwodu oraz wiązka układa się co 1). W tabeli 1.2 zamieszczono także liczby przeplotów zliczone na powierzchni wzorów – w polu prostokąta o wymiarach skoku nawijania – s i obwodu części walcowej butli πd . Liczbę przeplotów można także obliczyć z zależności: $L_p = 8N_p(T - N_p)$, gdzie $N_p = T/N_r(i)$ (N_p to wzór mozaikowy z szeregu według liczby przeplotów, rys. 4.14). Wynik zależności nie może być liczbą naturalną, zawsze trzeba go zaokrąglić do liczby naturalnej. W tabeli 1.2 zamieszczono wartości N_p . Wzory mozaikowe: 27/11, 44/7, 28/11 oraz 53/15 są przypadkami szczególnymi, dla których wartość N_p wyznacza się inaczej, co przedstawiono w rozdziale 4.

Z danych zamieszczonych w tabeli 1.2 wynika, że w zbiornikach komercyjnych stosuje się wzory mozaikowe z wizualnie efektownym układem rombów, które

Tabela 1.2. Zaobserwowane wzory mozaikowe oznaczone zgodnie z zasadami metody tablicowej. Przedstawiono także liczby występujących przeplotów w obszarze skoku nawijania w odniesieniu do liczby przeplotów wzoru N_r1

Badany zbiornik	Znaleziony wzór mozaikowy tablica/wzór	N_p – numer w szeregu ze względu na liczbę przeplotów	Lp – liczba przeplotów w znalezionym wzorze	Lp_{N_r1} – liczba przeplotów we wzorze N_r1
I	11/4	3	192	80
	19/9	2	772	144
	29/4	7	1235	224
	31/15	2	464	240
II	15/4	4	352	112
	26/5	5	840	200
	34/5	7	1512	264
	39/10	4	1120	304
III	14/1	1	104	104
	23/4	6	816	176
	25/6	4	672	192
	26/5	5	840	200
	27/11	5	880	208
IV	11/5	2	144	80
	25/8	3	528	192
	37/9	4	1056	288
	41/8	5	1440	320
V	44/9	5	1560	344
VI	44/7	19	3800	344
VII	7/3	2	80	48
	28/13	5	920	216
	35/12	3	768	272
	45/11	4	1312	352
	51/13	4	1504	400
VIII	11/5	2	144	80
	33/16	2	496	256
	39/10	4	1120	304
	49/12	4	1440	384
	53/15	7	2576	416
IX	25/6	4	672	192
	29/6	5	960	224
	33/8	4	928	256

występują przy małych liczbach Np , ale nie spotyka się wzorów N_r1 . W ostatniej kolumnie tabeli 1.2 podano liczby przeplotów wzoru N_r1 dla tej samej tablicy T . Z porównania obu kolumn, liczby przeplotów we wzorach mozaikowych stosowanych przez producentów zbiorników widać znaczną redukcję liczby przeplotów (redukcja wad w materiale dla zastosowanych wzorów N_r1).

Podsumowując, należy stwierdzić że:

- Producenci zbiorników stosują różne wzory mozaikowe. Trudno jest wyróżnić wzór uprzywilejowany. Liczba przeplotów w stosowanych wzorach wynosi 80–3800. Każdy zbiornik zawiera inne wzory mozaikowe w warstwach krzyżowych, inną sekwencję i liczbę warstw, inne kąty nawijania w warstwach, inne szerokości użytych wiązek i odstępów pomiędzy wiązkami itp.
- Jak wspomniano we wstępie, przeploty są wadą w materiale kompozytowym uzyskanym za pomocą technologii nawijania do zastosowań na zbiorniki wysokociśnieniowe. W badanych zbiornikach znaleziono tylko jedną warstwę krzyżową z wzorem mozaikowym zawierającym najmniejszą liczbę przeplotów, określaną według metody tablicowej jako N_r1 . Była ona użyta w warstwie wykonanej pod małym kątem około 14° . Prawdopodobnie była dobrana z innych względów niż chęć uzyskania najmniejszej liczby przeplotów.
- Redukcja liczby przeplotów, czyli redukcja wad materiałowych w kompozycie nawijanym przez zastosowanie wzorów mozaikowych N_r1 , może być kilkukrotna. Może się to przyczynić do większej wytrzymałości zmęczeniowej wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych.
- W zbiornikach handlowych stosuje się wzory mozaikowe z efektywnym układem rombów, które występują dla małych wartości liczbowych Np . Można to zaobserwować przez porównanie wartości Np zestawionych w tabeli 1.2 z wartościami $Np_{\max}$. Maksymalną wartość Np można wyznaczyć z zależności $Np_{\max} = T/2$.

1.2. Sformułowanie problemu rozwiązanego w pracy

Główny problem podjęty w niniejszej pracy dotyczy typowania w wyniku badań optymalnego wzoru mozaikowego do zastosowań w kompozytowych zbiornikach wysokociśnieniowych wytwarzanych metodą nawijania. Wzory mozaikowe będą rozumiane w sensie makroskopowym jako sposób ułożenia wiązek rowingu w elemencie wykonanym metodą nawijania. Pojęcie struktura jest szersze od pojęcia wzoru mozaikowego warstw krzyżowych, ponieważ struktura to cała budowa materiału kompozytowego całej ścianki zbiornika, w której znajdują się również warstwy obwodowe i wzdłużne, a wiązki włókien ułożone są równolegle. Do pojęcia struktura dochodzą jeszcze inne cechy materiału, jak kąt ułożenia wiązek, naciąg, technologia nawijania, wady, pęknięcia itd. Należy zwrócić uwagę na wpływ różnych sposobów ułożenia wiązek we wzorach mozaikowych i związaną z tym

wytrzymałość elementu wykonanego metodą nawijania zbiornika. Na rysunkach 4.11 i 4.12 przedstawiono wzory mozaikowe oraz zaznaczono trzy charakterystyczne obszary różniące się liczbą i rozmieszczeniem przeplotów. Są to schematy związane zawsze z widokiem wzorów mozaikowych, nierozłącznym elementem metody nawijania krzyżowego. Wzór mozaikowy charakteryzuje liczba przeplotów i ich rozmieszczenie w postaci charakterystycznych rombów. Wielkość rombów i ich liczba zależy od liczby przeplotów. Im większa liczba przeplotów, tym większa liczba rombów (rys. 6.1 i 6.2).

Różnorodność zastosowanych wzorów może być przyczyną rozbieżności wyników badań dotychczas wykonywanych przez wielu badaczy. Wyniki badań autora, zaprezentowane w rozdziale 6 oraz przegląd literatury zawarty w rozdziale 5, potwierdzają słuszność podanej tezy.

Materiał kompozytowy uzyskany w wyniku zastosowania metody nawijania jest bardzo sprasowany, wiązki włókien są ze sobą związane i ułożone zgodnie z zaplanowanym programem w warstwach. Z wyborem wzoru mozaikowego związana jest liczba i rozmieszczenie przeplotów. Przeplot jest sposobem układania wiązek rowingu w czasie nawijania, dającym w efekcie widok tzw. splotu koszykowego. W przeplotach, punktach załamania włókien, powstają koncentracje naprężeń, początki pęknięć. Jest to spowodowane miejscowym odchyleniem osi włókien od pierwotnego kierunku. W okolicach przeplotów obserwuje się także lokalnie zróżnicowane udziały żywicy oraz defekty w postaci pęcherzy powietrza. Miejsce przeplecenia jest zaburzeniem struktury, może być traktowane jako wada, karb, inicjator pęknięć itp. Wcześniejsze prace z udziałem autora wskazują na wpływ doboru wzoru mozaikowego na powstawanie i rozwój pęknięć w materiale kompozytowym [54, 64]. Zgodnie z metodą tablicową, wymienione prace określają wzór N_r1 warstwy krzyżowej jako najbardziej korzystny, ponieważ zawiera ona najmniejszą liczbę przeplotów w obszarze skoku nawijania s . Na rysunku 4.23 przedstawiono schemat przykładowego wzoru N_r1 z tablicy 11, z zaznaczonymi miejscami charakterystycznymi. Według metody tablicowej daje to oznaczenie 11/1, o liczbie przeplotów $Lp = 80$ (por. także tab.1.2, zbiorniki I, IV i VIII).

Z wyników przeprowadzonych badań, przedstawionych w poprzednim punkcie, można wnioskować, że producenci zbiorników kompozytowych przeprowadzają dobór wzorów mozaikowych w sposób przypadkowy, prawdopodobnie kierując się względami wizualnymi, związanymi z widokiem efektownych rombów. Dlatego uznano za zasadne zbadanie wpływu ułożenia wiązek włókna wzmacniającego według wzorów mozaikowych w ścianie kompozytowych butli wysokociśnieniowych na właściwości wytrzymałościowe, pod obciążeniem statycznym i zmęczeniowym.

1.3. Cel pracy

Celem opracowania jest wyłonienie, za pomocą ciśnieniowych badań wytrzymałościowych optymalnych struktur wzmocnienia ścianki zbiorników kompozytowych, wykonanych według wzorów mozaikowych, oraz opracowanie zasad projektowania nawijanych struktur wzmocnienia kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych. Chodzi o wskazanie i potwierdzenie mechanizmów powstawania i rozwijania się uszkodzeń w ciśnieniowych konstrukcjach kompozytowych wykonanych metodą nawijania oraz typowanych do użycia wzorów mozaikowych wzmocnienia.

1.4. Tezy pracy

W publikowanych pracach z udziałem autora [26, 27, 32, 34, 35, 44, 48, 53, 54, 59, 64, 68, 71, 83, 97] postawiono hipotezę, że o wytrzymałości rur i butli kompozytowych decydują występujące w strukturze wzmocnienia przepłyty rozmieszczone we wzorach mozaikowych. Wyjaśniono to również w innych pracach z udziałem autora [24, 28, 29, 43, 58]. Uczestnictwo autora w projektach badawczych¹⁾ potwierdziło zasadność podejmowanej tematyki.

Analiza geometrii nawijania związana z wzorami mozaikowymi, przeprowadzona za pomocą autorskiej metody tablicowej, umożliwia przewidzieć jakość konstrukcji właśnie ze względu na gęstość występowania i rozmieszczenie przepłótów. Przeprowadzone badania wskazują, jakie konstrukcje typuje się do stosowania.

Nakreślony wcześniej problem badawczy umożliwia sformułowanie tez pracy odnoszących się do dowolnej tablicy wzorów mozaikowych (por. pkt 4.2). W tablicy podano wszystkie dające się uzyskać wzory mozaikowe z tym samym wzmocnieniem (takie samo wzmocnienie pod tym samym kątem). Wymienione dalej tezy odnoszą się do wyników badań porównawczych wspomnianych wzorów wzmocnienia ścianek nośnych butli kompozytowych:

1. Wzory mozaikowe nawijanego włókna wzmacniającego mają wpływ na wytrzymałość ścianki nośnej kompozytowych butli wysokociśnieniowych, w tym na powstawanie i rozprzestrzenianie się pęknięć.
2. Istnieje takie ułożenie wiązek włókna wzmacniającego z użyciem metody nawijania (taki wzór mozaikowy), przy którym jest zapewniona optymalna praca włókien wzmocnienia w elemencie obciążonym ciśnieniowo.
3. Liczba przepłótów i ich rozmieszczenie (linie przepłótów i uskoku) mają decydujący wpływ na powstawanie i rozprzestrzenianie się pęknięć w kompozytowym elemencie nawijanym, obciążanym ciśnieniowo.

¹⁾ Najważniejsze projekty, w których autor uczestniczył, to: StorHy [189], HyComp [130], InGAS [134] Hy-Cube, POIG.01.01.02-00-016/08, POIG.01.01.02.-02-002/08.

2. Użytkowanie wysoko sprężonych paliw gazowych – CNG i CH₂

Autor w czasie przedstawiania wyników swoich prac w formie referatów krajowych spotykał się wielokrotnie z kontrowersyjnymi uwagami dotyczącymi użytkowania wysoko sprężonych paliw gazowych w pojazdach samochodowych. Chodziło głównie o aspekty bezpieczeństwa eksploatacji wysokociśnieniowych instalacji zasilania pojazdów użytku publicznego, w tym wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych. Z tego powodu autor uznał za celowe podanie poniższych informacji dotyczących już powszechnego użytkowania wysoko sprężonych paliw gazowych w Europie i na świecie. Niektóre z przytoczonych danych są imponujące.

Bardzo dynamicznie rozwinęło się wykorzystanie paliwa CNG do zasilania pojazdów [95, 105, 108, 180]. Jeszcze w roku 2000 informatory statystyczne donosiły o 2,5 mln, natomiast obecnie podaje się 17 mln pojazdów zasilanych CNG na świecie. Najwięcej pojazdów zasilanych CNG porusza się w Argentynie (ok. 2 mln) i Brazylii (ok. 1,8 mln). Jednak szybko na pierwsze miejsce wysuwają się Pakistan i Indie, z liczbą około 3 mln pojazdów. Należy zaznaczyć, że w Indiach są to w większości małe trójkołowe pojazdy z silnikami i zbiornikami małych pojemności. Przewiduje się, że w Chinach dopiero nastąpi gwałtowny wzrost liczby pojazdów zasilanych CNG; w 2000 r. rejestrowano ich około 50 tys., natomiast obecnie około 0,5 mln. Inne liczące się rynki na świecie to USA i Japonia (nawet dziesięciokrotny wzrost liczby pojazdów w ciągu ostatnich pięciu lat). W Europie liderem są Włochy (w 2000 r. ponad 430 tys., obecnie 600 tys.), jednak tam dynamika wzrostu liczby pojazdów CNG jest bardzo mała w porównaniu np. z Niemcami (w 2000 r. ponad 14 tys., obecnie 85 tys.). Najbardziej liczącymi się graczami w Europie, o których w statystykach 2000 r. nie wspomniano, są Ukraina (120 tys.) i Bułgaria (60 tys. pojazdów). Inne liczące się rynki europejskie to Szwecja (w 2000 r. ponad 1,8 tys., obecnie 23 tys.), Francja (w 2000 r. ponad 5,5 tys., obecnie 13 tys.) i Szwajcaria (obecnie 8 tys.). Polska zyskuje coraz większą pozycję na rynku; w 2000 r. mieliśmy poniżej 100 pojazdów, natomiast obecnie z liczbą około 2 tys. przewyższyliśmy poziom takich krajów, jak Czechy czy Holandia.

Przedstawiona dynamika rozwoju zasilania paliwem CNG nie jest związana z aspektami ekologicznymi, ale głównie z ekonomicznymi, ponieważ relatywna cena

CNG jest około dwa razy mniejsza od ceny benzyny (porównanie 1 m³ gazu jest równy ok. 1 l benzyny), w niektórych krajach nawet trzy razy mniejsza, np. Węgry, Litwa, a nawet pięć razy mniejsza – np. Ukraina, Rosja. Nieco inna sytuacja jest w Niemczech, ponieważ oprócz wprowadzenia niskiej ceny gazu, rząd prowadzi specjalną politykę różnych ulg i preferencji dla użytkowników CNG, aż do 2018 r. Ponadto wdrożony tam został program budowy sieci dotowanych stacji tankowania CNG, których obecnie jest 1100. Rząd Niemiec kierował się głosem ekologów, którzy oszacowali redukcję emisji CO₂ o 100 tys. ton rocznie przy istniejącej flocie aut zasilanych CNG. Także firma Mercedes donosi, że taksówkarze niemieccy w 90% zamawiają pojazdy zasilane CNG.

W roku 2007 na spotkaniu tzw. szczytu G-8, który odbył się w Japonii, podano informację, że na świecie użytkowanych jest około 600 mln pojazdów, natomiast do 2020 r. ta liczba ma się podwoić. Jednocześnie jedna z dyrektyw Unii Europejskiej zakłada, że w 2020 r. co piąty samochód będzie zasilany paliwem gazowym. Dziś odsetek aut zasilanych paliwem gazowym w Europie wynosi 2%. Przedstawione prognozy zakładają bardzo duży skok ilościowy. Uwzględniając przedstawione wcześniej informacje na temat dotychczasowego rozwoju paliwa CNG, a także tego, że Polska w krótkim czasie stała się niekwestionowanym liderem w Europie, jeśli chodzi o użytkowanie aut zasilanych LPG¹⁾ (ok. 2 mln aut, podobny poziom mają jedynie Turcja i Korea Płd.), duża dynamika rozwoju CNG jest w Polsce możliwa.

Użytkowanie paliwa CNG w konwencjonalnych silnikach tłokowych zostało już całkowicie zbadane i wdrożone, zdobywa sobie coraz większą popularność i uznanie. Podobnie z paliwem wodorowym zasilającym silniki tłokowe – na razie są one nieliczne, ale ich liczba rośnie (np. ekologiczne autobusy w centrum Berlina czy znaczna część autobusów obsługujących lotnisko w Monachium). Jednak przyszłość to ogniwa paliwowe zasilane wodorem. Ta technologia jest powszechnie badana praktycznie przez wszystkie firmy samochodowe. Wstępem do tej technologii jest użytkowanie ogniw paliwowych i napędu elektrycznego zasilanych CNG, a właściwie czystym metanem. Oznacza to, że doświadczenia zdobyte podczas użytkowania CNG będą bardzo pomocne w czasie użytkowania CH₂ do zasilania ogniw paliwowych. Częścią wspólną tych dwóch układów jest instalacja wysokociśnieniowa wraz ze zbiornikiem. Należy także dodać, że spośród grupy tzw. paliw alternatywnych, takich jak biopaliwa, energia słoneczna, elektryczna zgromadzona w akumulatorach, LPG itp. wysoko sprężone paliwa gazowe są absolutnym faworytem. Jest to związane z dostępnością paliwa CNG (metanu) oraz z dużą sprawnością i osiąganymi silników spalinowych zasilanych CNG, porównywalnymi z benzynowymi.

¹⁾ LPG jest produktem ubocznym pochodzącym z przetwórstwa ropy naftowej; wobec ograniczonych zasobów ropy, dostępność LPG jest również ograniczona.

2.1. Instalacje zasilania wysoko sprężonym metanem i wodorem

Istotą zasilania gazowego silnika jest doprowadzenie do komory spalania mieszanki gazowo-powietrznej o optymalnych proporcjach. Aby ten warunek został osiągnięty, w układ musi być wbudowany tzw. reduktor, który zapewnia dostawę do silnika gazu zawsze pod stałym, znacznie niższym, ciśnieniem, niezależnie od ciśnienia gazu w butli. Ta idea jest znacznie prostsza od idei zasilania silnika paliwem w postaci ciekłej. Nawet pierwsze konstrukcje silnika spalinowego Otto były zasilane gazem. Nowoczesne układy zasilania gazem ze względów bezpieczeństwa mają wiele dodatkowych zabezpieczeń, sterowanych i kontrolowanych elektronicznie, takich jak zawory odcinające, dodatkowe reduktory, czujniki ciśnienia gazu oraz temperatury itp. Bardzo ważną rolę odgrywają systemy ciągłego monitorowania stanu wyężenia kompozytowej powłoki nośnej butli. Autor uczestniczył w pracach dotyczących systemów ciągłego monitorowania na pokładzie samochodu w ramach projektu StorHy [189]. W zespole analizowano różne systemy wykorzystujące przewodnictwo elektryczne włókien węglowych [15], emisję akustyczną [23, 40], ultradźwięki [22], pomiary tensometryczne. Jednak najbardziej obiecujące okazały się systemy czujnikowe wykorzystujące powszechnie rozumiane światłowody [4, 46, 49, 50, 55, 75, 76, 115].

2.2. Istota problemu magazynowania wysoko sprężonych paliw gazowych w pojazdach

Istotnym elementem wysokociśnieniowego układu zasilania pojazdu jest zbiornik. Masa konwencjonalnych zbiorników stalowych CNG wyrażona w kilogramach jest równa w przybliżeniu liczbie wyrażającej objętość wodną w litrach, czyli butla stalowa o objętości 50 l waży około 50 kg. Zbiorniki CNG tankowane „do pełna” osiągają ciśnienie 200 barów. Dodatkowo objętość zbiornika z paliwem CNG pod maksymalnym ciśnieniem wystarczy na przejechanie około 1/3 dystansu, który pokona pojazd zasilany benzyną zgromadzoną w zbiorniku o tej samej objętości. Oznacza to, że pojazd zasilany CNG, wyposażony w konwencjonalne butle stalowe, musi zredukować maksymalną ładowność, np. małe samochody 5-osobowe – o jedną osobę, a autobus o 10 osób, z zasięgiem porównywalnym z pojazdem konwencjonalnym. Przy zasilaniu wodorem sytuacja jest jeszcze bardziej niekorzystna, ponieważ wodór jest mniej kaloryczny niż metan. Dlatego obecne układy zasilania są wyposażone w zbiorniki z ciśnieniem pracy do 350 barów. Jak wspomniano wcześniej, aktualnie wchodzi na rynek zbiorniki z homologacją ciśnienia pracy do 700 barów, ale np. firma Quantum prowadzi prace badawcze nad zbiornikami wodorowymi z homologacją do 1050 barów. Przy takich parametrach eksploatacyjnych masa wodorowych butli stalowych jest nie do przyjęcia. To jest główny powód rosnącego znaczenia butli kompozytowych, których masę można



Rys. 2.1. Typy zbiorników wysokociśnieniowych

zredukować nawet czterokrotnie w porównaniu ze stalowymi. Scharakteryzowane technologie wymuszają stosowanie w pojazdach lekkich wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych, produkowanych również na masową skalę. Zbiorniki kompozytowe stanowią też największy problem dla konstruktorów pojazdów zasilanych CNG i CH₂. Wynika to z następujących zagadnień:

- gabarytów zbiornika – stosunkowo duży element,
- trudności w zabudowie, ograniczona możliwość zmiany kształtu,
- ograniczonych możliwości uchwycenia (najlepiej za króćce),
- wymogów stosowania osłon,
- potencjalnego zagrożenia, stwarzanego przez zbiornik,
- dużej masy w porównaniu ze zbiornikami paliw ciekłych.

W wynikach prac badawczych nad sposobem magazynowania wodoru, zawartych w raporcie końcowym programu badawczego StorHy [189], możemy znaleźć zapis, że ze wszystkich trzech znanych technik gromadzenia wodoru, a mianowicie w ciałach stałych, w postaci ciekłej i w postaci sprężonej, ta ostatnia jest najbardziej realna, tzn. najbezpieczniejsza, a jej eksploatacyjna cena – najatrakcyjniejsza.

2.3. Zbiorniki wysokociśnieniowe – typy konstrukcji

Zbiorniki kompozytowe z uwzględnieniem zagadnień związanych z kompozytowym opłotem nośnym zostały dokładnie opisane pracach [5–9, 21, 23, 25, 27, 28, 30, 38, 40–43, 45] oraz innych wymienionych w spisie literatury. Na rysunku 2.1 przedstawiono schematy czterech typów butli. Zgodnie z obowiązującymi standardami, z których najważniejsze to [206, 218, 221], każda butla handlowa musi być zakwalifikowana do któregoś z wymienionych typów. Podstawowe i najważniejsze parametry eksploatacyjne zbiorników wysokociśnieniowych podane na tabliczce informacyjnej, to:

- masa pustego zbiornika,
- dopuszczalne ciśnienie pracy P_w ,
- ciśnienie próbne P_T ,
- ciśnienie niszczące P_B .

Tabela 2.1. Wartości minimalnych ciśnień niszczących w MPa, CNG/CH₂ oraz współczynniki bezpieczeństwa [206, 221]

Typ zbiornika	Typ 1		Typ 2		Typ 3		Typ 4	
Materiał wzmocnienia	Współcz. bezp.	Ciśn. niszcz.	Współcz. bezp.	Ciśn. niszcz.	Współcz. bezp.	Ciśn. niszcz.	Współcz. bezp.	Ciśn. niszcz.
Metal	2,25	45/158	–		–		–	
Włókno szklane	–		2,75	55/193	3,65	73/256	3,65	73/256
Włókno aramidowe	–		2,35	47/165	3,1	62/217	3,1	62/217
Włókno węglowe	–		2,35	47/165	2,35	47/164	2,35	47/164

Wartości wymienionych ciśnień podają normy zamieszczone w spisie norm, w zależności od konstrukcji (współczynniki bezpieczeństwa – tab. 2.1 i 2.2). Standardy wyróżniają (oprócz całkowicie metalowego) trzy typy konstrukcji zbiorników kompozytowych. Typ 2 – zwany także „półkompozytowym”, butla metalowa z nawiniętym na części cylindrycznej w kierunku obwodowym wzmocnieniem. Typ 3 – z wewnętrzną powłoką metalową zapewniającą szczelność (tzw. dętka lub liner) oraz z powłoką nośną z wysokowytrzymałego materiału kompozytowego, nawiniętego na całej powierzchni zewnętrznej butli. Typ 4 – którego powłoka nośna wykonana jest z wysokowytrzymałego materiału kompozytowego, jak w typie 3, ale z dawką z tworzywa sztucznego.

W czasach kiedy stal i para wodna zajmowały znaczące miejsce w technice, konstrukcje ciśnieniowe, takie jak butle, stały się podzespołami powszechnego użytku. Pierwsze technologie wytwarzania butli i zbiorników były związane z metodą nitowania, kucia, zgrzewania. Techniki wytwarzania zbiorników metalowych oraz procedury obliczeniowe i normalizacyjne nie stanowią tajemnic. Jest to związane z użytkowaniem zbiorników metalowych od ponad wieku oraz sprawdzeniem ich w dużym zakresie zastosowań (są tanie i powszechne). Ich kształt geometryczny oraz zastosowanie narzucają określone współczynniki bezpieczeństwa, np. dla zbiorników metalowych CNG czy CH₂ współczynnik wynosi 1,1 (tab. 2.2). Metody wyznaczania nośności zbiorników są proste i powszechnie uznane.

Butle i linery metalowe (stal, aluminium itd.) bezszwowe wykonywane są z tzw. kęsa podgrzanego do temperatury zapewniającej tzw. ciastowatość materiału. Kęs wrzucany jest do zamkniętego cylindra, formy, gdzie po użyciu nurnika wkładanego do cylindra pod dużym ciśnieniem formowany jest kielich – rura z dnem. Inny sposób uzyskania kielicha, zwłaszcza krótkich butli lub samych denic, to metoda tłoczenia z arkusza blachy w specjalnych precyzyjnie wykonanych formach z użyciem stempli. Drugi etap to zagławianie kielicha lub rury bezszwowej: wprowadzenie kielicha w ruch obrotowy we wrzecionie maszyny podobnej do tokarki, a następnie formowanie, zagławianie kielicha specjalną rolką w podwyższonej temperaturze. Wykonuje się także butle i linery bezszwowe z tzw. rur bezszwowych przez zagławianie z obu końców rury. Tą technologią wykonywane są zwłaszcza butle długie, w których długość przekracza np. dziesięciokrotnie średnicę. Butle i linery metalowe mogą być również wykonane z użyciem metody spawania, np.

Tabela 2.2. Charakterystyka kolejnych typów zbiorników wysokociśnieniowych, walcowych zbliżonych do konstrukcji spełniających wymogi dla sprężonego gazu ziemnego CNG i wodoru [206, 218, 221] o objętości wodnej około 100 l

Typy zbiorników	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4 (najnow-szej generacji)
Przybliżony stosunek masy właściwej butli CNG do jej pojemności wodnej	1,0–1,5 kg/l	0,65–1,3 kg/l (0,75 [221])	0,3–0,45 kg/l	0,3–0,45 i niżej kg/l
Orientacyjna cena w PLN	50–3000	1000–5000	1000–15000	Powyżej 30000 (4000 umożliwi masową komercjalizację)

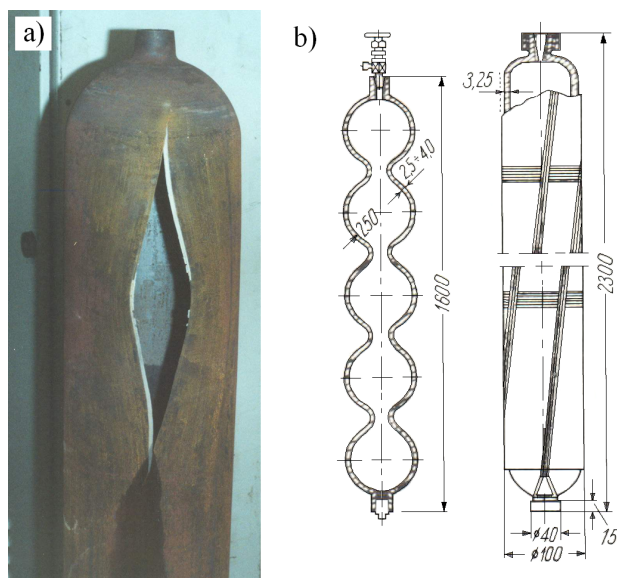
sferycznej czaszy (dennicy) do rury z obu końców. Część cylindryczna może być zwinięta z arkusza blachy i spawana lub bezszwowa.

Metalowe zbiorniki walcowe oraz inne, wykonane z materiałów izotropowych, nie są wyrobem idealnym ze względu na rozkład naprężeń w ścianie. W części walcowej zbiornika naprężenia obwodowe są dwa razy większe od wzdłużnych. Oznacza to, że pęknięcie zbiornika walcowego, wykonanego z materiału izotropowego, będzie miało podłużny wygląd, na kierunku tworzącej walca, tak jak to przedstawiono na rysunku 2.2a.

W ścianie zbiornika izotropowego w kształcie kuli czy w czaszach (dennicach) sferycznych naprężenia są jednakowe we wszystkich kierunkach oraz takie jak wzdłuż części cylindrycznej zbiornika. Z tego powodu pojawiały się konstrukcje butli złożonych ze sfer (rys. 2.2b). Inne ciekawsze rozwiązania dotyczyły wzmocnienia części walcowej na kierunku obwodowym. Niestety w latach pięćdziesiątych XX w. nie były jeszcze znane techniki wytwarzania wysokowytrzymałych włókien (szklanych, węglowych itp.), dlatego wzmocnienie wykonywano z użyciem taśmy lub drutu tzw. patentowanego, obrobionego plastycznie i cieplnie w celu uzyskania lepszych właściwości wytrzymałościowych w kierunku wzdłużnym [148].

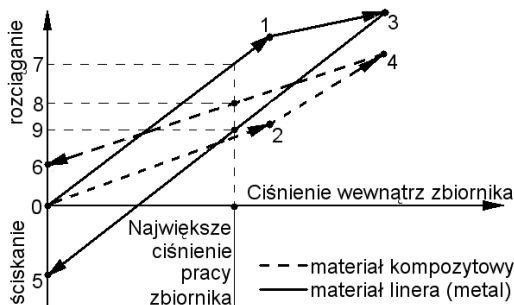
2.4. Wymagania stawiane zbiornikom kompozytowym

Kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe muszą spełnić wiele ostrzejszych wymogów w porównaniu z wymogami dotyczącymi butli stalowych [3, 154, 222, 224–227, 230]. W pracy [152] podano tabelę norm ASTM, według których analizuje się elementy wykonywane metodą nawijania oraz przedstawiono charakterystykę badań w zakresie testowania materiałów kompozytowych. Idąc wyżej w tej piramidzie wysokich standardów wytrzymałościowych dla zbiorników kompozytowych, okaże się, że



Rys. 2.2. Butle stalowe: a) po badaniach niszczących cieczą,
b) złożona z połączonych ze sobą sfer i wzmocniona taśmą stalową,
tzw. patentowaną [148]

wymagania dla zbiorników sprężonego paliwa wodorowego (ciśnienia pracy 700 barów, niszczące ok. 2000 barów) będą znacznie przewyższały wymienione wymogi dotyczące konstrukcji kompozytowych, w tym butli CNG [51, 52]. Najważniejsze z nich są następujące: każda butla przeznaczona na wysoko sprężone paliwa gazowe, poddawana jest próbie odkształcenia przy ciśnieniu próbnym (minimum 1,5 ciśnienia roboczego), zmiana objętości nie może przekroczyć 5%. Innym wymogiem jest poddanie butli, z partii 200 szt., próbie ciśnień hydrostatycznych (3750 cykli) do ciśnienia próbnego, a następnie rozerwanie. W wyniku rozerwania nie mogą powstać więcej niż trzy części. Natomiast nowa norma francuska, którą omówiono w pracy [222], inne zamieszczone w spisie norm (patrz s. 162) i omówione w [51, 52], nie dopuszczają powstawania części po rozerwaniu (fragmentacji) w żadnej próbie. Inne próby, po których następuje rozerwanie – a ciśnienie rozerwania jest miarą zaliczenia testu – to: test udarowy, pięciokrotne upuszczanie z wysokości 1,2 m na odpowiednio ukształtowaną pryzmę stalową, a następnie wykonanie 12 000 cykli o amplitudzie ciśnienia 300 barów, próba wygrzewania w 70 °C przez 1 000 godz., test ogniowy, ostre cykle testów środowiskowych (wilgoć, szoki termiczne od +60 °C do –50 °C), próba wad materiałowych polegająca na nacinaniu płaszcza nośnego piłą diamentową na głębokość 50% grubości kompozytu, próba strzału z broni palnej i wiele innych. Wymienione próby oraz inne przeprowadzone i opisane w pracach z udziałem autora [56, 57, 60, 65, 70, 73, 74] wskazują, że stawia się wysokie wymagania wykonaniu butli kompozytowych. Zmusza to producentów do



Rys. 2.3. Schemat wyjaśniający idee procesu przepięzania butli kompozytowej typu 2 lub 3 zawierających liner metalowy

uwzględniania wszystkich parametrów technicznych podwyższających jakość wykonywanych butli. W projektowaniu kompozytowych butli ciśnieniowych ważnym elementem jest znalezienie pewnego optimum pomiędzy kosztem wykonania butli a jej wymogami związanymi z przeznaczeniem, z założeniem spełnienia obowiązujących norm zebranych na s. 162 oraz omówionych w [3, 51, 52, 154, 222, 230].

W końcowym etapie wytwarzania butli typu 2, niekiedy typu 3 (zależy to od grubości ścianki lineru), po utwardzeniu syciwa poddaje się butle tzw. przepięzaniu. Rozumie się przez to proces ciśnieniowy, przewyższający ciśnienie próbne. Na tym poziomie naprężeń przekroczona zostaje nieznacznie granica plastyczności metalu. Po przywróceniu ciśnienia zerowego metal ulega ściskaniu, a nawinięty kompozyt – rozciąganiu. Dla normalnego ciśnienia roboczego naprężenia powstałe w linerze metalowym są mniejsze niż w standardowej butli, która nie była poddana przepięzaniu. Na rysunku 2.3 przedstawiono schemat obrazujący proces przepięzania butli kompozytowej. Butla poddawana jest ciśnieniu większemu niż ciśnienie pracy, osiągając stan 1 w linerze i 2 w kompozycie. Dalsze podwyższanie ciśnienia prowadzi do nieznacznego odkształcenia plastycznego w linerze 3 i zwiększenia naprężenia w ściance kompozytowej 4. Obniżenie ciśnienia do zera powoduje powstanie w linerze naprężeń ściskających 5, a w kompozycie rozciągających 6. W czasie normalnej pracy butli w zakresie do największego ciśnienia pracy, największe naprężenia w ściance lineru osiągają stan 9, a nie – jak w stanie wyjściowym – 7. Naprężenia w ściance kompozytowej są większe – 8. Uzyskany w ten sposób stan naprężeń prowadzi do większej wytrzymałości zmęczeniowej butli, przy której wytrzymałość lineru metalowego jest kluczowa.

3. Materiały kompozytowe wzmocnione włóknem ciągłym

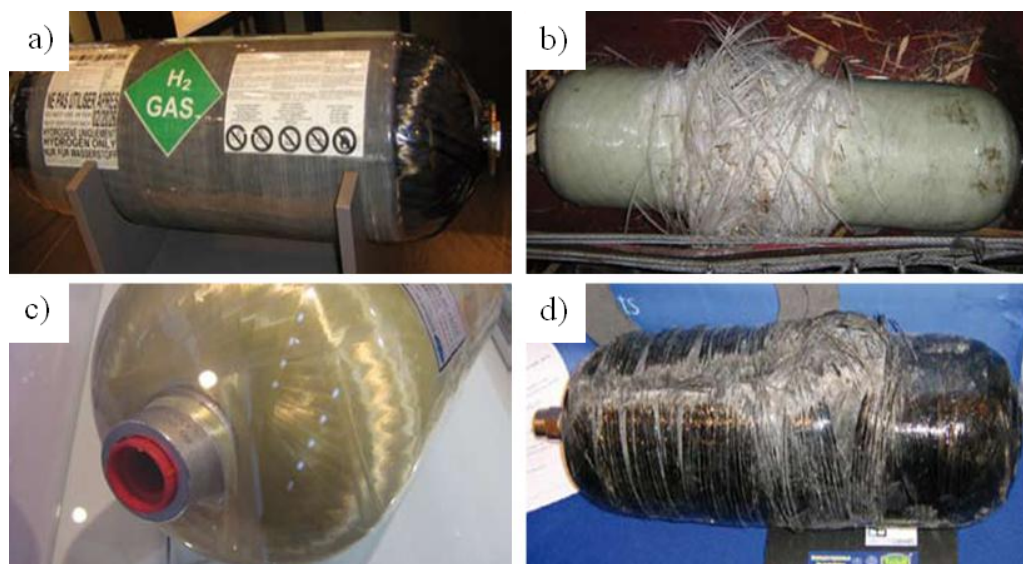
Wśród aktualnych problemów naukowych i inżynierskich szczególne miejsce zajmuje zagadnienie projektowania i wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych ze sterowanymi właściwościami fizykomechanicznymi, elektrycznymi itp. Takimi materiałami są kompozyty – *materiały kompozytowe wzmocnione włóknem ciągłym*. Użyta w procesie technologicznym wiązka włókien wzmacniających ma jeden początek i jeden koniec. Do wykonania elementu czy konstrukcji z kompozytowego materiału wzmocnionego włóknem ciągłym wiązki włókien wzmacniających pobierane są ze szpul oraz ułożone są w sposób uporządkowany i zaplanowany. Spośród różnych kombinacji, najlepsze właściwości mechaniczne (wysoką wytrzymałość właściwą – wytrzymałość odniesioną do masy) materiału kompozytowego zbiorników wysokociśnieniowych uzyskuje się przy zespoleniu mocnych, długich włókien z jednorodnym, chemicznie utwardzalnym syciwem [139, 143–145, 196]. Dla odmiany kompozytowy materiał włóknisty wrzucony bezwładnie do form i sprasowany (tzw. tłoczywo) nie jest kompozytem wzmocnionym włóknem ciągłym, ponieważ włókno nie jest ułożone w sposób uporządkowany i zaprojektowany. Także laminat wykonany z użyciem maty, tkaniny itp. nie jest kompozytowym materiałem wzmocnionym włóknem ciągłym, ponieważ włókno jest wielokrotnie cięte, np. na brzegach tkanin.

Wytrzymałość właściwa, np. kompozytu ES (epoksydowo-szklanego), przewyższa wytrzymałość dobrych gatunków stali i stopów metali. Polimerowe kompozyty węglowe, np. EW (epoksydowo-węglowe), charakteryzuje jeszcze wyższa wytrzymałość właściwa, ponieważ gęstość włókna węglowego jest około dwukrotnie mniejsza od szklanego. Ponadto kompozyty wzmocnione włóknami węglowymi charakteryzują się bardzo dużą sztywnością, co w odniesieniu do gęstości czyni je niezastąpionymi w wielu konstrukcjach. Do cech charakterystycznych kompozytów wzmocnionych włóknem ciągłym można zaliczyć między innymi:

- niejednorodność struktury,
- dużą anizotropię właściwości,
- dużą wrażliwość na technologię wykonania i czynniki konstrukcyjne,
- wrażliwość na stan powierzchni międzyfazowej (włókno-żywica).

Tabela 3.1. Porównanie właściwości włókien wzmacniających

Rodzaje włókna	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej [GPa]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]
Bazaltowe	2,63	3000–4840	91–110	3,1
Szklane-E	2,54	3100–3800	72,5–75,5	4,7
Szklane-S	2,54–2,57	4020–4650	83–86	5,3
Węglowe	1,78	3500–6000	230–600	1,5–2,0
Aramidowe	1,45	2900–3400	70–140	2,8–3,6



Rys. 3.1. Widoki butli kompozytowych wzmocnionych różnymi rodzajami włókien:

a) węglowym, b) szklanym, c) aramidowym, d) bazaltowym
(butle z włókien szklanych i bazaltowych po badaniach niszczących)

3.1. Włókna wzmacniające ścianki nośne zbiorników

W tabeli 3.1 przedstawiono właściwości włókien wzmacniających oraz ich podstawowe parametry. Wszystkie z nich nadają się do wzmocnienia ścianki nośnej butli kompozytowej, jednak trzeba sobie zdawać sprawę z różnic w pracy pomiędzy tymi włóknami, wynikających z ich parametrów technicznych i reologicznych. Najbardziej popularne oraz najlepsze są włókna węglowe, jednak ich cena jest najwyższa. Należy zwrócić uwagę, że zakresy wytrzymałości i moduły sprężystości włókien węglowych są bardzo szerokie w zależności od parametrów temperaturowych ich wytwarzania (tab. 3.1). Współczynniki bezpieczeństwa okre-

ślone w standardach (tab. 2.2) nie uwzględniają tak szerokiego zakresu parametrów. Także ceny włókien węglowych zaczynają zbliżać się do cen włókien szklanych. Włókno szklane, którego koszt jest niższy od węglowego oraz aramidowego (Kevlar), dawałoby niewątpliwie rozwiązania znacznie tańsze. Niestety przy podobnej wytrzymałości włókno szklane ma moduł Younga trzykrotnie mniejszy niż moduł włókna węglowego i np. dwukrotnie mniejszy niż Kevlar 49. Natomiast włókno aramidowe jest kłopotliwe w przetwórstwie, trudno się przesyca, zapętla się, a ewentualne odłączenia się pojedynczych włókien zaburzają proces wytwarzania. Włókno szklane sprzyja wczesnemu powstawaniu mikropeęknięć w materiale, co może stanowić istotne przeciwwskazanie do jego stosowania w konstrukcjach z relatywnie małymi współczynnikami bezpieczeństwa. Ponadto ma wyraźnie niższą wytrzymałość zmęczeniową, szczególnie w porównaniu do węglowego. W tabeli 2.1 (rozdz. 2) podano minimalne wymagane ciśnienia niszczące dla różnych typów zbiorników (CH₂, CNG) wykonanych z różnymi włóknami wzmacniającymi. Ciśnienia niszczące butli wykonanych z włókna szklanego są o 1,3 większe niż ciśnienia niszczące butli z włókna węglowego (zawarte w tab. 2.1 współczynniki bezpieczeństwa 2,35 odpowiadają włóknom węglowym i 3,65 – włóknom szklanym).

Na rynku można spotkać coraz więcej producentów włókien bazaltowych. Ich parametry są obiecujące, mogą wypełnić lukę pomiędzy włóknami węglowymi i szklanymi. Nie znaleziono na świecie producenta butli kompozytowych wzmacnianych włóknami bazaltowymi i aramidowymi na masową skalę, natomiast zdjęcia przedstawione na rysunku 3.1 wykonano na wystawie JEC w Paryżu, (te zbiorniki znajdowały się przy stoiskach producentów włókien aramidowych i bazaltowych). Firma QUANTUM stosuje włókna aramidowe (typu PBO) jedynie na wierzchnią warstwę ochronną swoich zbiorników.

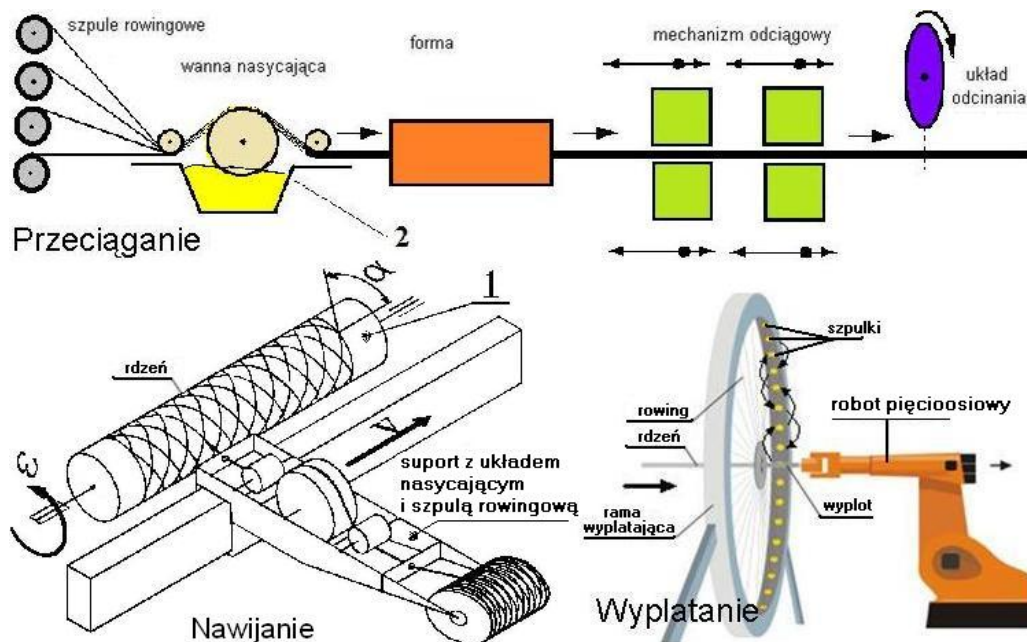
Obecnie obserwuje się rosnące zainteresowanie kompozytami hybrydowymi wzmocnionymi różnymi rodzajami włókien [23, 119, 121]. Dzięki zastosowaniu sztywniejszych włókien, które również lepiej współpracują z osnową polimerową, znacznie zwiększono parametry eksploatacyjne kompozytowych elementów nawijanych [230]. Jednak główną przyczyną stosowania różnych włókien w materiale kompozytowym jest redukcja kosztów. Firmy produkujące butle z kompozytów hybrydowych, to: Composite Aquitaine, EDO Corporation, Raufoss A/S, MAN Technologie, Luxfer, Rutgers, Ciba, Scott, Structural, X-perion. Publikowane dane na temat badań wytrzymałościowych zbiorników hybrydowych (por. np. [120]) są dość fragmentaryczne. Wskazują jednak na odmienne mechanizmy dekohezji między warstwami wzmocnionymi różnymi typami włókien.

Najlepszym materiałem do wzmocnienia ścianki butli kompozytowych mogłyby być tzw. nanorurki węglowe, jednak jak na razie są one niedostępne ze względu na wysoką cenę, są również zbyt krótkie.

3.2. Wytwarzanie materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym w kontekście zbiorników kompozytowych

W wytwarzaniu materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym dominują dwie techniki: przeciąganie (ang. *pulltrusion*) i nawijanie (ang. *filament winding*) lub ich łączenie (ang. *pullwinding*) (rys. 3.2). Są to najbardziej uniwersalne sposoby wytwarzania, ale powstaje wiele ich odmian, modyfikacji [80, 119, 143, 152, 171, 185]. Technikę wyplatania można zaliczyć do metod wytwarzania materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym [61, 62, 125, 127, 128] (rys. 3.2 i rys. 3.3).

Metoda przeciągania polega na powolnym przeciąganiu włókna odwijanego ze szpul przez układ nasycający, a następnie przez grzaną formę [84]. Wewnątrz formy następuje utwardzanie materiału (pręta, profilu itp.). W tej technice uzyskuje się stałe warunki utwardzania, przesycania, udziału składników, naciągu włókna itp., które można dobrać na optymalnym poziomie. Uzyskany materiał jest jednokierunkowy, o dobrym upakowaniu włókien w osnowie polimerowej, co daje bardzo dobre parametry współpracy włókien i syciwa w czasie obciążania. Jednym z problemów tej techniki jest skurcz termiczny, w wyniku którego następuje pękanie materiału wewnątrz. W pierwszym etapie procesu zewnętrzne powierzchnie profilu kompozytowego przylegają do gorącej formy; to one utwardzają się szybciej, a wnętrze



Rys. 3.2. Schemat przeciągania (pultruzji), nawijania oraz wyplatania (por. rys. 3.3)

profilu jest nieutwardzone. Dopiero w drugim etapie następuje utwardzanie środka oraz jego skurcz i ewentualne pęknięcia. Problem ten pojawia się także w metodzie nawijania podczas wytwarzania zbiorników z grubymi ściankami.

Metoda nawijania polega na nawijaniu na obracający się rdzeń (formę, wzornik) włókna wcześniej przesyconego żywicą [80]. Uzyskany materiał kompozytowy (wyrób, element) nie będzie miał tak dobrych parametrów określających współpracę włókna i osnowy, jak materiał uzyskany metodą przeciągania. Różnica pomiędzy tymi materiałami będzie polegała na:

- większej zawartości pęcherzy powietrza, które są defektem – w metodzie przeciągania liczbę pęcherzy można łatwiej zredukować,
- większym udziale żywicy, co objętościowo osłabia materiał – nawijanie około 50% wag., przeciąganie nawet do 75% wag.,
- zmieniającej się odległości pomiędzy wiązkami włókien, wynikającej z pojawiania się przepłotów i ułożenia poprzecznych włókien, zmiennego naciągu,
- mniej stabilnych i jednolitych warunkach utwardzania w metodzie nawijania,
- zmiennej prędkości przechodzenia wiązki przez układ nasycający w metodzie nawijania, co prowadzi do nierównomiernego nasycenia,
- nierównomiernym utwardzaniu na przekroju ścianki kompozytowej, związanym np. z efektem egzotermicznym.

Wszystkie wymienione problemy przyczyniają się do większej skłonności do powstawania defektów w materiale uzyskanym w wyniku nawijania, ale stosowanie pojawiających się na rynku coraz to nowszych materiałów i technik wytwórczych umożliwia zacieranie się różnic właściwości materiałów wytwarzanych za pomocą tych dwóch technologii.

W pewnym sensie uniwersalny materiał kompozytowy uzyskuje się przez zastosowanie metody przeciągania z nawijaniem (ang. *pollwinding*). Jest to rozszerzona metoda przeciągania, która polega na nawijaniu przesyconego włókna na włókno wciągane do formy. Wtedy uzyskujemy materiał kompozytowy jednokierunkowy w środku, a na zewnątrz materiał z włóknami ułożonymi pod kątem. Możliwe są różne kombinacje tych warstw oraz wytwarzanie profili zamkniętych, np. rur.

Inny sposób wytwarzania materiału kompozytowego wzmocnionego włóknem ciągłym, to metoda wyplatania (rys. 3.2 oraz 3.3). Wykorzystuje ona jednocześnie wiele szpul z włóknem, które pomiędzy sobą wykonują ruch przemienny (zaznaczono strzałkami na rys. 3.2). W efekcie powstaje na obiekcie (np. linerze) tzw. wypłot. Następnie tak wykonany wielowarstwowy wypłot należy przesyścić dowolną techniką, najlepiej z grupy tzw. infuzyjnych LCM, np. RTM. Wadą tego procesu jest długi czas przygotowawczy oraz późniejsze przesycań wypłotu. Ponadto wielokrotnie przewijane włókno w tej technologii ma więcej wad związanych z uszkodzeniami powierzchni zewnętrznymi, złamań oraz ma inaczej przygotowaną powierzchnię, tzw. pokrycie włókiennicze, które utrudnia dobre zwilżenie włókna [61, 62, 125, 127, 128]. Oznacza to, że metoda wyplatania jest

bardziej uciążliwa oraz w efekcie daje materiał o gorszych właściwościach niż metoda nawijania.

W przedstawionych procesach technologicznych można wykorzystywać włókno w postaci tzw. preimpregnatu (ang. *prepreg*). Jest to wiązka włókien już przesyconych żywicą, nawinięta na szpulę [87]. Materiał ten ma określony przez producenta tzw. czas życia (ok. 60 dni) oraz musi być przechowywany w niskiej temperaturze. Po podgrzaniu do temperatury około 80 °C prepreg zaczyna utwardzać się. Jest to półprodukt bardzo wygodny w użyciu, dzięki czemu w czasie nawijania czy pultruzji można uprościć te techniki, zrezygnować z uciążliwego układu nasycającego. Jednak po przeanalizowaniu całego procesu wytwarzania prepregu okaże się, że otrzymany z tego półproduktu materiał zawiera lokalne obszary wrażliwe na powstawanie defektów – duża zawartość spętłonych pojedynczych włókien oraz sfalowań, rozluźnień, zapętleń włókna oraz zapowietrzenia nawijanego materiału kompozytowego.

W procesie wytwarzania, np. rowingu szklanego, jest on od razu nawijany na tzw. bobinę (szpulę). Dodatkowe przewijanie nie wchodzi w rachubę, ponieważ w czasie przewijania włókno niszczy się, a pojedyncze włókna w wiązce rowingowej zmieniają naciąg, następuje falowanie oraz wyjście na zewnątrz wiązki. Powoduje to liczne przerwania, uszkodzenia i zapętlenia.

Metoda nawijania stosowana jest do wytwarzania profili konstrukcyjnych, rur, butli itp. (zagadnienia te autor dokładnie omówił w [28, 80]). Wymienione wyroby mogą pracować pod ciśnieniem, służyć do magazynowania oraz transportu różnych gazów, chemikaliów i substancji technicznych jako elementy konstrukcyjne (np. w lotnictwie) i elektroizolacyjne. Mają również wiele innych zastosowań, w których masa, odporność chemiczna, kierunkowość właściwości itp. są czynnikami decydującymi.

Metoda nawijania na mokro jest najlepsza do wykonania zbiorników kompozytowych o największych parametrach eksploatacyjnych. Inne metody są zastępcze, w niektórych zastosowaniach mogą okazać się atrakcyjne ekonomicznie, ale do wytwarzania zbiorników typu 4 najnowszej generacji stosuje się jedynie metodę nawijania na mokro.

3.3. Inne metody wytwarzania butli kompozytowych

W poprzednim podrozdziale przedstawiono techniki wytwarzania materiału kompozytowego o dobrych właściwościach uzyskiwanych w procesie przeciągania. Dobry materiał kompozytowy można uzyskać także w czasie nawijania tzw. obwodowego, np. podczas wykonywania butli typu 2 (rys. 2.2). Nawijanie odbywa się ze skokiem mniejszym niż szerokość wiązki, prędkości obrotowa rdzenia i ruchu suportu są stałe, prędkość nasycania włókna w układzie nasycającym też jest stała. W takich warunkach uzyskuje się materiał o podobnych parametrach do przeciągania. W czasie nawijania obwodowego warunki procesu są na tyle stabilne,

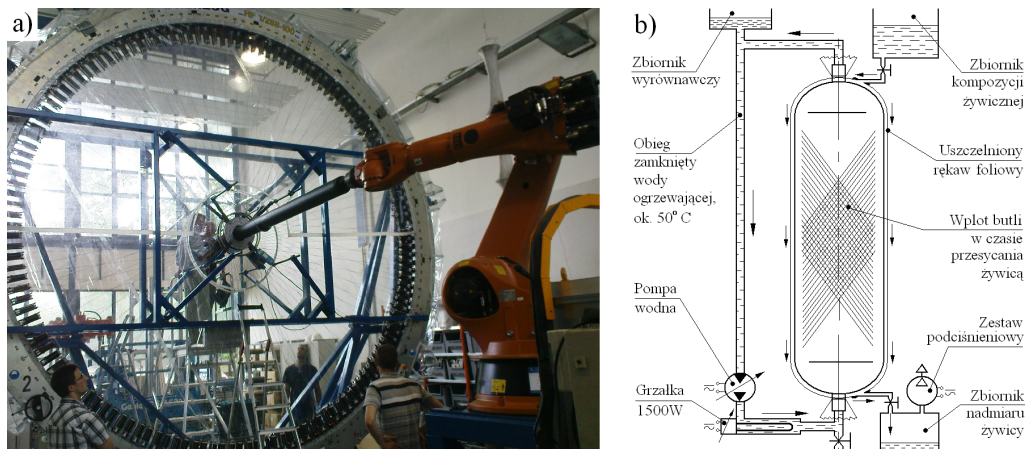
że można zastosować spoiwa termoplastyczne. Na rynku dostępne jest włókno z odpowiednim udziałem spoiwa termoplastycznego, również w postaci włókien o nazwie handlowej „Twintex” (polietylen, polipropylen itp.). Po podgrzaniu włókna spoiwa topią się. Klasyczna metoda nawijania z użyciem tego półproduktu nie wymaga obecności układu nasycającego, natomiast tuż przy rdzeniu, w zbiorniku nawijanym, musi znajdować się palnik gazowy do szybkiego podgrzewania podłoża i nawijanego włókna ze spoiwem. Wtedy syciwo termoplastyczne znajdujące się w wiązce topi się, przesycia włókno wzmocnienia oraz łączy się z podłożem. Jest to nowa technika, która przy licznych wadach ma wiele zalet i nosi znamiona technologii rozwojowej. Może ona być stosowana także podczas przeciągania, ale w klasycznej metodzie nawijania na razie jest nieprzydatna ze względu na zmianę prędkości obrotowej na nawrotach, krzyżowaniu się włókien itd. Proces nawijania krzyżowego nie jest stabilny, tak jak jest podczas pultruzji czy w nawijaniu obwodowym.

Firma COMAT w Niemczech opracowała oryginalny sposób wytwarzania butli z użyciem ciągłej metody nawijania z przeciąganiem – *pullwinding*. Polega ona na wytwarzaniu rury jako profilu zamkniętego metodą pultruzji, a następnie, w systemie ciągłym, rura jest owijana włóknem z syciwem termoplastycznym. W końcowym etapie procesu wytworzona rura jest cięta na odcinki, przyszłe butle. W osobnym procesie termicznego kształtowania dennicy następuje umieszczenie metalowego króćca i zaprasowanie go w dennicy. Zaletą tego rozwiązania jest homologowanie sposobu kształtowania dennicy butli, a nie konkretnego zbiornika o określonej objętości. Firma po uzyskaniu jednej homologacji może produkować dowolne butle, tzn. o różnych objętościach (długościach).

Na Uniwersytecie w Kaiserslautern IVW opracowano sposób nawijania pierścieniowego (ang. *ring winding*) [181]. Polega on na nawijaniu kilkoma wiązkami naraz, które wychodzą z pierścienia równomiernie podzielonego, np. na 8 części. Dzięki temu proces nawijania jest szybszy. Przy okazji każda wiązka jest prowadzona osobno w rurkach z tworzywa sztucznego, w których panuje podciśnienie ograniczające powstawanie pęcherzy powietrznych. Sposób jest rozwojowy.

We współpracy z TU Drezno autor wykonał w ramach tej pracy kilka prototypów butli metodą wyplatania [125, 127, 128]. Do tego celu użyto wyplatarki o średnicy koła wyplatającego 6 metrów, maksymalna liczba przeplatających się wzajemnie szpul wynosiła 130 sztuk (zdjęcie, rys. 3.3a). Liner butli mocowano za króciec wyjściowy umieszczony w uchwycie robota współpracującego z wyplatarką (schemat na rys. 3.2). W czasie wyplatania butla przesuwiała się przez koło wyplatające z prędkością wyznaczającą kąt wyplotu. Na kąt wyplotu ma również wpływ liczba szpul na kole. Kiedy butla zostanie pokryta wyplotem, zmienia się jego kierunek przesuwania i następuje wyplatanie drugiej warstwy itd.

Drugi etap tej metody polega na przesyleniu żywicy wykonanego na sucho wyplotu. Na rysunku 3.3b przedstawiono schemat nasycania metodą infuzji. W pra-



Rys. 3.3. a) widok wyplatarki w ILK TU Drezno w czasie wyplatania butli pojemności 60 litrów i długości 3 m,
b) schemat późniejszego procesu przesycania butli (infuzji)

cach [125, 127] wykonano przesycanie butli w pozycji pionowej. Butlę umieszczono wewnątrz rękawa foliowego, który uszczelniono na końcach. Do rękawa od góry podawano żywicę epoksydową, natomiast od dołu podłączono podciśnienie. Dodatkowo przez wnętrze butli przepuszczano wodę o temperaturze $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ w celu zmniejszenia lepkości kompozycji żywicznej. Proces infuzji trwał około 30 min. Po zakończeniu butlę owinięto elastyczną taśmą do momentu utwardzenia.

Inny sposób wytwarzania butli to metoda drosthalm [152]. Sposób ten polega na równoczesnym nawijaniu na liner włókna obwodowego pod kątem około 90° oraz podawaniu włókna ciętego w postaci maty. Chaotycznie rozmieszczone włókno cięte na odcinki 2–5 cm w płaszczu nośnym butli przenosi naprężenia wzdłużne. Dennice butli wykonywane są w drugim etapie metodą prasowania, z wykorzystaniem również włókien ciętych. Ten sposób wytwarzania nie wymaga skomplikowanej nawijarki, podobnie jak podczas nawijania warstw obwodowych.

Inna możliwość wykonywania kompozytowego płaszcza nośnego to naniesienie ciętego włókna na powierzchnie linera w postaci maty, natrysku, narzucenia włókna ciętego metodami przedstawionymi w [143, 152, 171], następnie zamknięcie w formie i przeprowadzenie ciśnieniowego wprowadzenia żywicy metodą np. RTM. Powstałe konstrukcje mogą być wykorzystywane do zastosowań niskociśnieniowych.

Można oczekiwać nowych, ulepszonych metod nawijania i stosowania nawijania kombinowanego, jednak najważniejszym kryterium weryfikacji butli będzie cena, masa oraz spełnienie wyjątkowo rygorystycznych wymagań badań homologacyjnych.

3.4. Przebieg niszczenia materiału kompozytowego w czasie obciążania zbiornika

Podstawowy problem wytrzymałości elementów kompozytowych poddanych działaniu obciążeń statycznych, zmęczeniowych czy korozji naprężeniowej [111], to rozwijające się różnego rodzaju uszkodzenia kompozytu, które dobrze scharakteryzowano w [87, 139, 144, 145], a także w opracowaniu autora [28]. Dalej podano jedynie w punktach uszkodzenia, które są ważne w kompozytach nawijanych oraz podczas porównywania materiałów kompozytowych o wzorach mozaikowych badanych butli. W takich materiałach można wyróżnić następujące uszkodzenia:

- odspojenie na granicy międzyfazowej włókno–lepiszcze,
- pęknięcia osnowy typu mostek pomiędzy odspojeniami, zwykle w kierunku prostopadłym do obciążenia (stan CDS – nasycenie laminatu pęknięciami tego typu [139], s. 380, [145], s. 151),
- pęknięcia osnowy typu *splitting*, rozchodzące się wzdłuż włókien,
- pęknięcia translaminarne osnowy rozchodzące się w poprzek włókien, które w późniejszym etapie powodują powstawanie rozwarstwień,
- pęknięcia włókien.

Postępująca liczba uszkodzeń wpływa na spadek właściwości mechanicznych materiału kompozytowego. Ulegają zmianie np. stałe sprężystości, wartości współczynników tłumienia drgań, przewodności cieplnej i gęstość materiału [22]. Pęknięcia wychodzące na zewnątrz płaszcza nośnego butli czy rurociągu znacznie ułatwiają infiltrację wody i mediów korozyjnych do wnętrza konstrukcji kompozytowej, uruchamiając rozwój korozji naprężeniowej [111, 143]. W projektowaniu i budowie odpowiedzialnych części nośnych konstrukcji wspomniane zjawiska zmuszają do przyjmowania w obliczeniach wytrzymałościowych wysokich współczynników bezpieczeństwa, np. dla zbiorników ciśnieniowych w przemyśle chemicznym osiągają one wartość 6–15. W obliczeniach konstrukcji lotniczych wartości odkształceń nie mogą przekraczać $\varepsilon < 0,3\text{--}0,4\%$, natomiast w konstrukcjach szczególnie narażonych chemicznie, współczynniki bezpieczeństwa osiągają nawet wartość 20–30, a czas eksploatacji nie przekracza dwóch lat (wg normy francuskiej NFT57900 i brytyjskiej BS4994 [230]).

3.5. Specyfika wytwarzania zbiorników kompozytowych

Najważniejsze zalety, świadczące o wyższości butli kompozytowych nad metalowymi, to:

- lekka konstrukcja,
- brak „iskrzenia” podczas otarć i uderzeń,
- brak odłamków w razie zniszczenia (np. przestrzelenie) butli,
- duża odporność chemiczna,

- nieduży koszt produkcji małoseryjnej (niewymagające homologacji),
- brak wyraźnego przejścia plastyczno-kruchego w niskich temperaturach.

Podczas projektowania elementu czy konstrukcji kompozytowej powinny być rozwiązywane problemy doboru struktury, w tym wzorów mozaikowych, ułożenia wzmocnienia oraz doboru reżimów przetwórstwa (przesycanie, utwardzanie itd.). Zagadnienia te mają znaczący wpływ na właściwości otrzymywanego materiału kompozytowego i nie mogą być ignorowane. Nie można dowolnie zmieniać typu włókna czy żywicy oraz temperaturowych reżimów utwardzania. Każda, nawet pozornie nieistotna, zmiana technologii (np. czasu utwardzania) może doprowadzić do uzyskania diametralnie innego materiału kompozytowego. Zagadnienia te zostały szerzej omówione w [132, 143, 144, 152, 171, 196]. Opracowanie i wykonanie wyrobu z materiału kompozytowego w skrócie obejmuje następujące etapy postępowania:

- obliczenia wytrzymałościowe, które są zwykle bardzo przybliżone,
- dobór materiałów,
- badania sprawdzające na prostych próbkach,
- ponowne obliczenia wytrzymałościowe,
- opracowanie konstrukcji,
- dobór parametrów technologicznych, w tym np. nawijania,
- wykonanie wyrobu,
- badania sprawdzające, często bardzo obszerne i długotrwałe.

3.6. Struktury ścianek nośnych zbiorników kompozytowych

Wielu badaczy proponuje różne sposoby ułożenia wiązek wzmacniających w ściankach nośnych butli wykonywanych metodą nawijania. Chodzi o takie ułożenie równomierne wiązek włókna w kompozytowej warstwie nośnej butli, aby sprostały one panującym obciążeniom oraz aby zostały użyte w jak najmniejszej ilości. W pracach [152, 171] podano sposoby nawijania wzmocnienia, w których kąt nawijania α jest określony przez długość butli, kształt dennicy oraz średnicę zewnętrzną króćców wyjściowych. Wzmocnienie w kierunku obwodowym, w tak wykonanym płaszczu nośnym, uzyskuje się przez dodatkowe nawinięcie warstw obwodowych ($\alpha \approx 90^\circ$). Oczywiście ma to logiczne uzasadnienie, ponieważ istnieje takie dobranie udziałów (grubości) warstwy obwodowej, wzdłużnej i krzyżowej, przy którym wytrzymałość zbiornika jest największa. W koncepcjach nawijania zwykle zaczyna się od warstwy obwodowej, następnie wzdłużnej, a dalej wykonuje się warstwy krzyżowe, zaczynając od małych kątów i kończąc ponownie na warstwie obwodowej. Łączna liczba warstw może dochodzić nawet do ośmiu. W tak wykonanym zbiorniku liczbę warstw można szacunkowo określić na podstawie wyglądu dennicy, charakterystycznych zgrubień, które są zakończeniem każdej warstwy. W tabeli 1.2, s. 13, zamieszczono wyniki analiz struktur kompozytowych

różnych zbiorników handlowych. Niektóre z nich miały 5 warstw krzyżowych, ale są też zbiorniki z jedną warstwą krzyżową. Sposób nawijania wieloma warstwami, stosowany przez kilka znaczących firm, został opisany także w pracy [135]. Autorzy w warstwach krzyżowych stosują wzór mozaikowy z równomiernie rozmieszczonymi przeplotami. Z treści wspomnianego wcześniej artykułu nie wynika, że dobrany wzór jest optymalny ze względu na powstawanie i rozwój pęknięć. W pracy [135], podobnie jak w pracach [152, 171], zastosowano wzmocnienie laminatu krzyżowego warstwą obwodową, w celu większego wzmocnienia całej struktury kompozytowej w kierunku obwodowym. Opracowanie [135] zawiera również opis programu komputerowego ze znacznie rozbudowaną grafiką do projektowania kompozytowych butli ciśnieniowych. Jednak są to obliczenia przybliżone, a rzeczywisty udział warstwy obwodowej i krzyżowej dobiera się dzięki żmudnym doświadczeniom. Materiały kompozytowe są bardzo wrażliwe na technikę wytwarzania i parametry przetwórstwa. Głównie z tego powodu bierze się rozbieżność wyników obliczeń i prac doświadczalnych.

3.7. Wykładziny wewnętrzne (linery) zbiorników kompozytowych

Zbiorniki kompozytowe należą do konstrukcji złożonych, kosztownych, trudnych w wykonaniu i w badaniach eksperymentalnych. Dodatkowo konstrukcję zbiorników komplikuje wykładzina wewnętrzna – dętka, (ang. *liner*). Grupę linerów metalowych scharakteryzowano w podpunkcie 2.3, natomiast dużo większą różnorodność materiałową i technologiczną stanowią linery z tworzyw sztucznych. W pracach wdrożeniowych związanych z raportem [169], autor testował takie techniki wytwarzania linerów, jak: spiekanie rotacyjne, rozdmuch, wtryskiwanie, zgrzewanie, spawanie, odlewanie, klejenie. Wybór techniki oraz materiał lineru zależy od wielkości produkcji oraz jej przeznaczenia. Liner jest odpowiedzialny za szczelność zbiornika i powinien zapewnić sztywność w czasie nawijania. Powinien też stanowić materiał barierowy dla przechowywanego gazu.

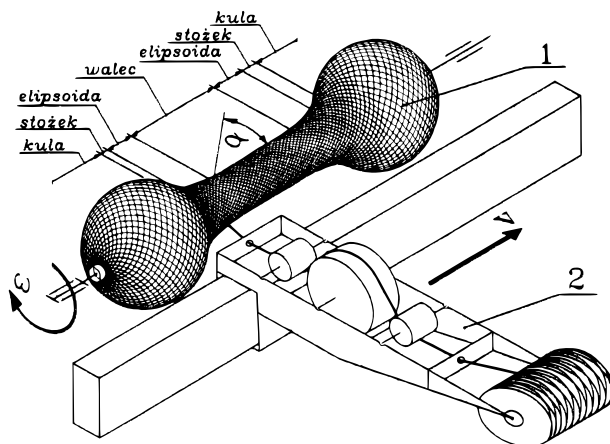
Zagadnienie wyboru materiału lineru i jego konstrukcji jest kluczowe w projektowaniu kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych. Zostało ono dokładnie opisane w raporcie NASA [190], który dotyczy badań eksploatacyjnych różnych materiałów konstrukcji linerów butli kompozytowych stosowanych dotychczas przez NASA. Analizy porównawcze stosowanych konstrukcji pokazały rozbieżności między danymi materiałowymi i wynikami analiz. Przedstawione wyniki sugerują, że naprężenia szczałkowe zbiorników oraz przestrzenny rozkład naprężeń jako funkcja ciśnienia mogą być całkowicie inne niż to wynika z przewidywań aktualnie istniejącej analizy stanu elastoplastycznego w materiale lineru. W niniejszej pracy nie analizowano zagadnień związanych z linerem, jednak na podstawie podanego stwierdzenia można sądzić, że wpływ technologii nawijania na obciążanie lineru w czasie wytwarzania zbiornika jest znaczący.

4. Projektowanie wzorów mozaikowych, analiza geometrii nawijania

W niniejszym rozdziale przedstawiono tablicową metodę analizy nawijania oraz, w celu porównania, metodę wykorzystywaną w komercyjnych oprogramowaniach do obsługi nawijarek sterowanych elektronicznie, tzw. CNC, na przykładzie programu CADWIND.

Wielu badaczy próbowało zgłębić problem różnorodności wzorów mozaikowych, np. w celu podania optymalnego wzoru. w badaniach nawijarki przemysłowe do wytwarzania próbek, a ich oprogramowanie nie ułatwia pogrupowania wzorów mozaikowych według tej samej liczby wiązek (tego samego wzmocnienia). Zdaniem autora jest to główna przyczyna nierozwiązania problemu optymalnego wzoru mozaikowego, zwłaszcza dla konstrukcji ciśnieniowych. Obecnie kryterium klasyfikacji wzorów mozaikowych opiera się na wielkości i liczbie charakterystycznych rombów lub trójkątów na części cylindrycznej, jednak z zebranej literatury przedmiotu wynika, że to kryterium nie uwzględnia całego spektrum wzorów mozaikowych.

Jednym z wielu sposobów wykonywania elementów kompozytowych z nośnikiem ciągłym jest nawijanie włókna, na przykład w postaci rowingu szklanego. Przesycony lepiszczem rowing (nośnik) nawija się na rdzeń w sposób uporządkowany, gwarantujący równomierne rozmieszczenie [143–145, 152, 171]; to znaczy, że w każdym przekroju poprzecznym nawiniętej bryły odstęp między włóknami (wiązkami) jest stały. Maszyna nawijająca jest podobna do tokarki (rys. 4.1). Rdzeń obraca się ze stałą prędkością kątową $\omega = \text{const}$, natomiast suport wykonuje ruch posuwisto-zwrotny z prędkością v . W przypadku nawijania wiązki na rdzeniu (rys. 4.1), który jest bryłą złożoną (kula + stożek + elipsoida + walec + ...) w ten sposób, aby rozmieszczenie wiązki było równomierne, prędkość liniową ruchu suportu v ogólnie określono wzorem: $v = dl/dt$, gdzie l jest drogą przebytą przez suport w czasie t . W przypadku, kiedy średnica rdzenia nie jest stała (rdzeń nie jest walcem, jak na rys. 4.1), prędkość ruchu suportu również nie będzie stała, natomiast będzie związana funkcją opisującą powierzchnię rdzenia. Optymalna prędkość nawijania włókna wynikająca z występujących procesów fizykochemicznych (chodzi tutaj o najlepsze przesycanie włókna) wynosi 91,4–106,7 m/min [152]. W punkcie 4.2.2 przedstawiono przypadek nawijania rury na rdzeniu walcowym o jednakowej grubości ścianki (część walcowa na rys. 4.1) oraz w punkcie 4.2.4



Rys. 4.1. Schemat procesu nawijania bryły złożonej:
 1 – rdzeń z nawijanym elementem kompozytowym,
 2 – suport z mechanizmem nasycającym i szpulą rowingową

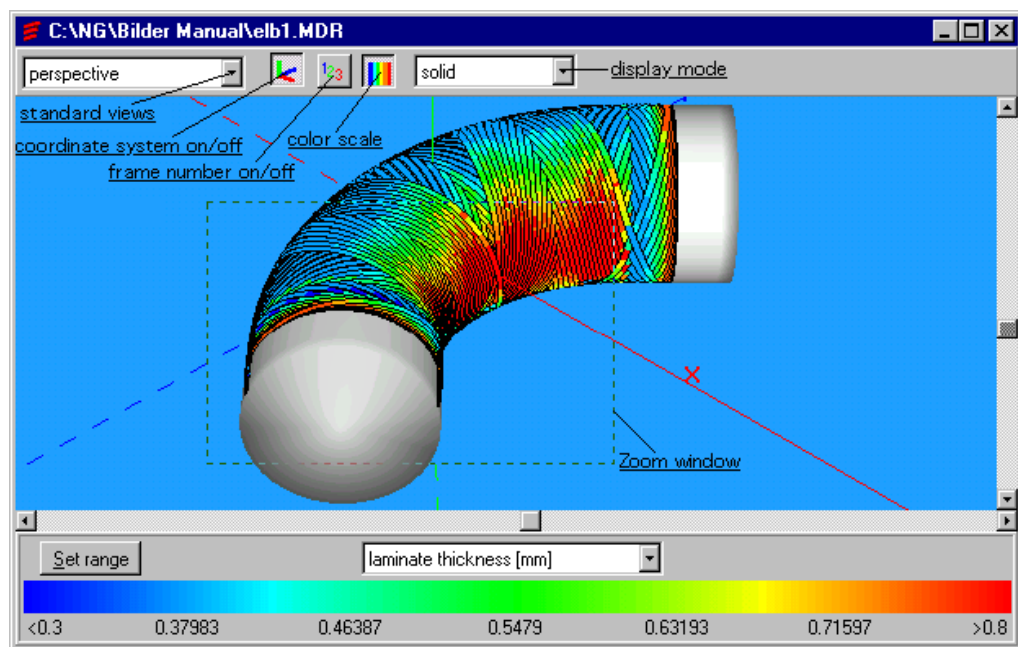
– na bryle złożonej z walca zakończonego dennicami. Metodą nawijania można wykonać również bryły nieobrotowo-symetryczne, np. torus [28].

Metoda tablicowa opracowana przez autora jest alternatywnym sposobem analizy nawijania, w porównaniu np. do sposobu wykorzystywanego w oprogramowaniu CADWIN. Metoda tablicowa wykorzystuje proste zasady graficzno-analityczne, dowolny wzór mozaikowy opisują jedynie dwie liczby (np. 11/4 – wielkość tablicy/numer wiersza).

4.1. Oprogramowania komercyjne na przykładzie CADWIND

CADWIND jest to oprogramowanie wspomagające projektowanie elementów nawijanych, takich jak rury, butle, kolanka, trójniki i wiele innych brył o skomplikowanych kształtach [155]. Algorytm tego oprogramowania wybrał autor jako przykładowy, ponieważ jest ono najbardziej zaawansowane. Nawijarki (takich jak Mikrosam, Pultrex, MacLaren & Anderson i wiele innych) charakteryzuje bardzo podobny algorytm. W czasie projektowania elementu nawijanego program może:

- zaprojektować geometrię przestrzenną modelu, na którym po nawinięciu można zobaczyć wzór mozaikowy (rys. 4.2),
- wyznaczyć parametry nawijania (kąt nawijania, skok, liczbę wiązek na obwodzie itd.),
- za pomocą kolorów sygnalizować grubość nawiniętego oplotu (materiału kompozytowego); operator może sobie zażyczyć podanie dokładnej informacji o grubości oplotu w dowolnym punkcie (rys. 4.2),

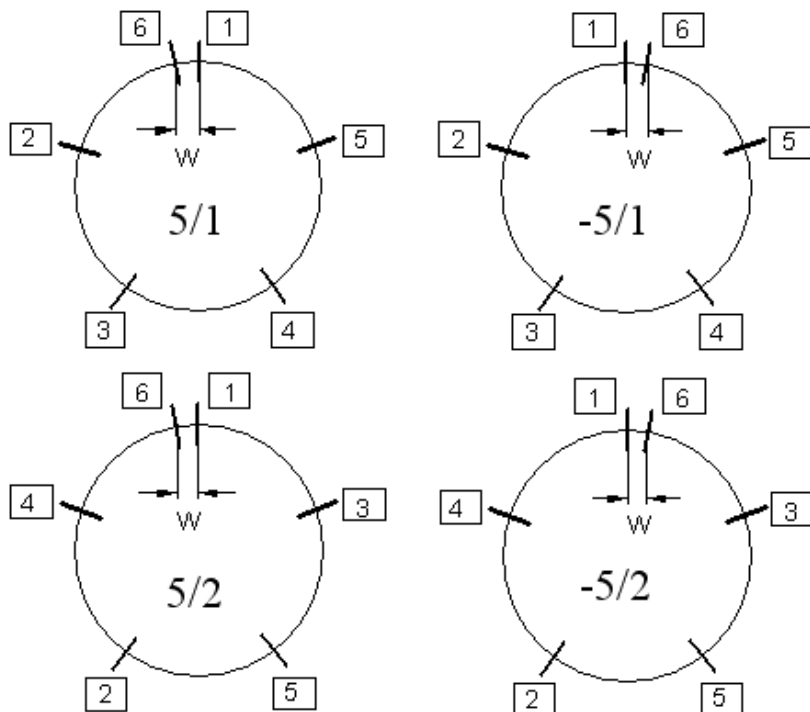


Rys. 4.2. Okno graficzne oprogramowania CADWIND [155]

- podać informacje nt. zapotrzebowania na materiały, włókno i żywicę (opcja nawijania na sucho (do infuzji), na mokro i prepregiem),
- umożliwić przeprowadzenie obliczeń MES oraz wygenerować dane do dowolnego oprogramowania CAD i MES,
- wygenerować kody do nawijarek CNC oraz graficznie wyświetlić monitorowanie maszyny, wspomagać nawijanie, wyświetlając na bieżąco jego postęp,
- podać parametry nawijarki: odległość i średnicę oczka (punkt wyjścia wiązki z suportu na rdzeń), wysokość oczka od osi rdzenia, liczbę szpul, siłę naciągu itp.

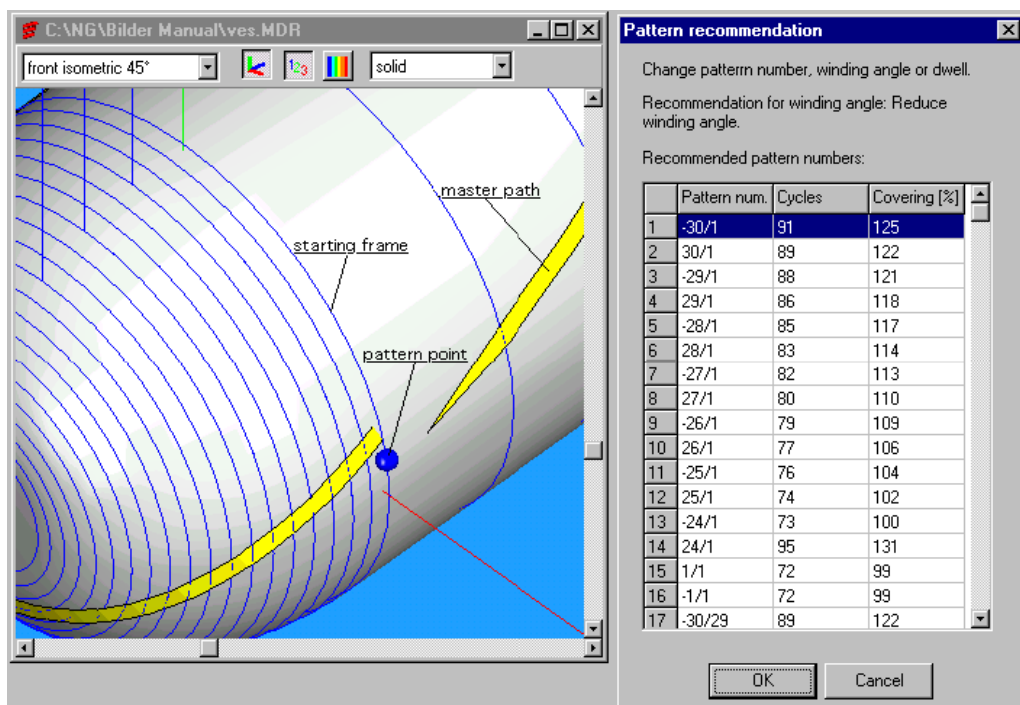
Mimo tak bardzo rozbudowanego oprogramowania, rzeczywista próba nawijania może się różnić od wzoru teoretycznego, np. ze względu na poślizg wiązki. Jest to normalne zjawisko w metodzie nawijania, jednak możliwości, jakie daje oprogramowanie, są bardzo duże. Korekty można wprowadzać ręcznie przez zmianę wyliczonych parametrów nawijania. Firma Material ciągle doskonali swoje oprogramowanie, o czym informuje na swojej stronie internetowej [155].

Algorytm opisu wzoru mozaikowego w oprogramowaniach komercyjnych różni się od algorytmu metody tablicowej. W podejściu komercyjnym (praktycznym) wzór mozaikowy charakteryzuje się na podstawie występujących mozaik, rombów czy trójkątów. Dlatego w programach komercyjnych wzór mozaikowy opisują dwie liczby: numer wzoru/indeks przeskoku (rys. 4.3), czyli inaczej: liczba charakte-



Rys. 4.3. Sekwencja cyklicznego punktu startowego wiązki,
 numer wzoru/indeks przeskoku: $5/1$, $-5/1$, $5/2$, $-5/2$. W – przejście włókna
 (szerokość wiązki w płaszczyźnie prostopadłej) [155]

rystycznych rombów/kolejność ich wypełniania. Znak minus oznacza układanie wiązki drugiej po lewej stronie pierwszej, przeciwne do ruchu wskazówek zegara. Numer wzoru to podział rdzenia. Na rysunku 4.3 przedstawiono schemat podziału rdzenia, liczba 5 oznacza podział rdzenia na 5 rombów, a każda następna wiązka jest dostawiana do jednej z tych pięciu. Druga liczba – indeks przeskoku – informuje, do której jest dostawiana wiązka następna, jeśli 1, to po kolei, jeśli 2, to co druga itd. Dostawianie odbywa się w odległości W , która oznacza szerokość wiązki w płaszczyźnie prostopadłej (e_x w metodzie tablicowej), tzn. że dopiero z parametru W można określić z ilu wiązek składa się romb. Trudno zatem znaleźć odpowiednik numeru wzoru/indeksu przeskoku w metodzie tablicowej. Dla $5/1$ jest to wzór mozaikowy N_r5 , dla $5/2$ jest to wzór N_r10 itd. Według takiego opisu (rys. 4.3) trudno metodologicznie pogrupować wzory mozaikowe według tej samej liczby wiązek na obwodzie rdzenia, czyli według tego samego wzmocnienia. Jeśli przyjmiemy liczbę wiązek na obwodzie rdzenia równą 11 oraz obwód $\pi d = 11$, jak w przykładzie (pkt 4.2.2, s. 46), to możemy wykonać 5 różnych wzorów nawijania charakteryzujących się tym samym wzmocnieniem. Według metody tablicowej



Rys. 4.4. Okno oprogramowania CADWIND w momencie wyboru wzoru mozaikowego dla nawijanego zbiornika [155]

będą to $N_r1, 2, 3, 4$ i 5 lub inaczej wzory $11/1, 11/2, 11/3, 11/4$ i $11/5$. Na rysunku 4.7 (s. 46) pokazano nawijanie (układanie wiązek na rdzeniu), które odbywa się w przeciwną stronę niż na rysunku 4.3. Natomiast w algorytmie CADWIND numer wzoru/indeks przeskoku, odpowiedni dla metody tablicowej, będzie wynosił: $11/1, 5/2, -4/3, 5/4$ i $2/5$, po zaznaczeniu, że $W = e_x = 1$. Jak widać, trudno w algorytmie CADWIND o proste uporządkowania w uszeregowaniu wzorów według tego samego wzmocnienia. Ponadto, jak zaznaczono wcześniej, do jednoznacznego opisu wzoru mozaikowego potrzebny jest trzeci parametr – W . W metodzie tablicowej tylko dwa: numer tablicy/numer wzoru mozaikowego (inaczej: podział obwodu rdzenia/miejsce wiązki w tym podziale). Ponadto w metodzie tablicowej wzór mozaikowy określa długość nawijania przez związek ze współczynnikiem a . Warto też zaznaczyć, że wzór N_r1 wszystkich tablic jest tego samego typu, podobnie do N_r2 . Oznacza to, że z widoku wzoru można określić jego oznaczenie, tak jak to zrobiono w podrozdziale 1.1.

Po zamodelowaniu geometrii obiektu nawijanego, np. butli oraz przyjęciu kąta nawijania i parametrów wiązki, program generuje tabelę możliwych do nawinięcia wzorów mozaikowych (rys. 4.4). W warunkach przemysłowych jest to bardzo

dobrze rozwiązanie, ponieważ zwykle istnieje już przygotowany liner i trzeba na nim wykonać oplot. Należy jedynie zdecydować się na konkretny wiersz tabeli. Kryterium wyboru może być następujące:

- według widoku wzoru mozaikowego w oknie symulacji nawijania (rys. 4.4),
- według wzoru mozaikowego zapisanego symbolami (kolumna pierwsza tab. na rys. 4.4) program nie podpowiada, który wzór jest najlepszy dla butli ciśnieniowej,
- według liczby przejść suportu (kolumna druga tab. na rys. 4.4),
- według wypełnienia (chodzi o tzw. zakładkę związaną z szerokością wiązki (por. z rys. 4.21; kolumna trzecia tab. na rys. 4.4).

Oprogramowanie CADWIND nie umożliwia klarownego prowadzenia badań wzorów mozaikowych. Podczas wyboru wzorów, które dają to samo wzmocnienie, tę samą grubość ścianki wykorzystują tyle samo wiązek włókna, ten sam kąt nawijania, taki sam udział włókna i żywicy. Jest to trudne do zrealizowania. Do tego zadania wykorzystano autorską metodę tablicową opisaną w następnym podrozdziale.

4.2. Metoda tablicowa analizy nawijania

Zaproponowana metoda tablicowa w prosty sposób podaje wszystkie możliwe do zrealizowania warianty nawijania włókna (wzory mozaikowe), zakładając uzyskanie regularnej sieci [28, 35]. Parametrami sterującymi są: współczynnik reszty skoku nawijania a oraz przyjęta liczba naturalna n podziału obwodu πd elementu nawijanego. Podział ten związany jest z szerokością e wiązki nawijanej (np. wiązka złożona z kilku rowingów szklanych), tworzącej regularną sieć – wzór mozaikowy. Dalej przedstawiono także przykłady wyznaczania wzorów mozaikowych dla wybranych parametrów i zobrazowano je szczegółowymi rysunkami. Wykonano program komputerowy do wyznaczania tablic wzorów mozaikowych, który na podstawie wybranego wiersza tablicy określa wzór mozaikowy.

Algorytm przedstawiony dalej wykorzystywano do projektowania i analizy wyników we wszystkich obiektach badanych w niniejszej pracy. Przedstawione wnioski odnoszą się do algorytmu metody tablicowej. Metodę tablicową wykorzystywano także do innych obiektów, jak np. rury skręcane, rury wyboczone, protezy przełyku i inne opisane w opublikowanych pracach z udziałem autora [98, 100–103].

4.2.1. Charakterystyka parametrów nawijania

Dalej przedstawiono analizę procesu nawijania prostego walca, z wykorzystaniem metody tablicowej, lecz pominięto następujące zjawiska występujące w trakcie trwania procesu:

- powiększanie się średnicy rdzenia w miarę przybywania włókna,

- bezwładność wiązki rowingowej,
- zsuwanie się wiązki, zwłaszcza w czasie nawrotów.

Najważniejszym parametrem mechanicznym jest kąt nawijania α związany z późniejszym obciążaniem elementu, tzn. ciśnieniem wewnętrznym lub skręcaniem, ściskaniem itp. Wielkość kąta wyznacza się z następujących zależności wyprowadzonych w [143, 152]:

$$\begin{cases} \sigma_o = \sigma_f \cdot \sin^2 \alpha \\ \sigma_w = \sigma_f \cdot \cos^2 \alpha \end{cases} \quad (4.1)$$

lub

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_w} = \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (4.2)$$

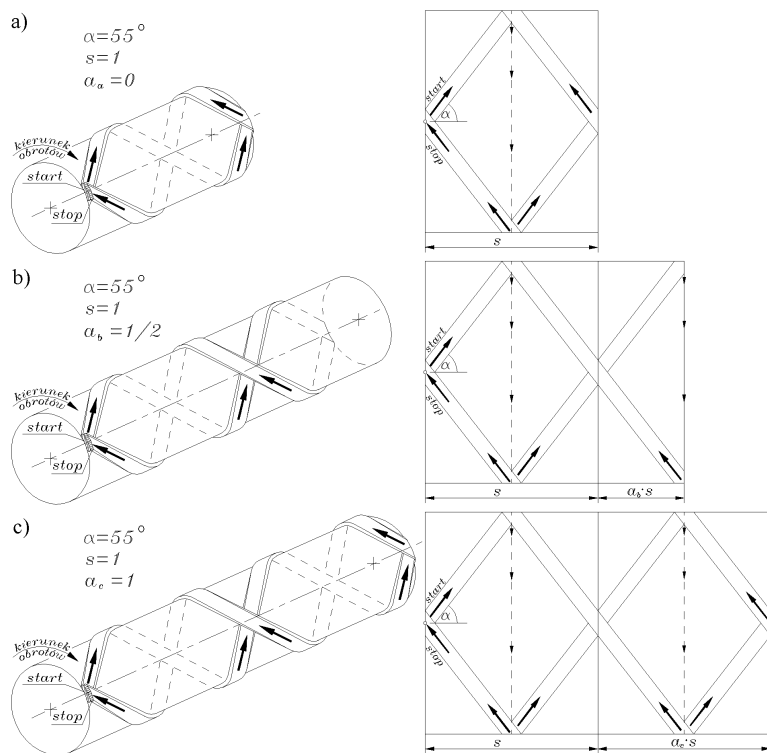
Innym dokładniejszym sposobem wyznaczania kąta nawijania jest sporządzenie wykresu pętli naprężeń [31, 99, 146, 197]. Przyjęto, że analizowany element rurowy będzie zaślepiony na końcach i będzie pracować jak butla ciśnieniowa. Dla tego przypadku teoretyczny kąt nawijania wynosi $\alpha \approx 55^\circ$, ponieważ w części cylindrycznej butli naprężenia obwodowe są dwa razy większe od wzdłużnych $\sigma_o/\sigma_w = 2$.

W ujęciu matematycznym wzory mozaikowe są przykładem tzw. geometrii skończonej, wchodzącej w zakres teorii parkietażu [149].

Wielu badaczy (np. [99, 197]) krytycznie odnosi się do tak przyjmowanej wartości kąta nawijania, ponieważ syciwo nie jest tu brane pod uwagę. Obecnie jakość żywic, pokrycia włókien są coraz lepsze, tzn. zapewniają dobrą współpracę włókien wzmocnienia między sobą. Czynniki te mogą wpłynąć na zmianę kąta nawijania o kilka stopni.

Z kąta nawijania α oraz średnicy rdzenia d wyznaczono następujące parametry: skok nawijania s , drogę, jaką przebędzie suport przy pełnym obrocie rdzenia, oraz współczynnik reszty skoku nawijania a , który wybrano z przedziału $a \in (0, 1)$. W pokryciu równomiernym rdzenia w taki sposób, że przy zadanej szerokości nawijanej wiązki (np. rowingu szklanego) powstała sieć, w której wiązki równoległe stykają się ze sobą i w każdym punkcie na powierzchni rdzenia znajdują się tylko dwie (górne i dolne, zorientowane w prawo i w lewo, tzn. jedno pod kątem α , a drugie pod kątem $180^\circ - \alpha$), wówczas została nawinięta warstwa. W laminatach wykonanych metodą nawijania nie ma jednak wyraźnej granicy pomiędzy warstwami, tak jak w laminatach z tkaniny, np. z włókna szklanego. Wynika to z indywidualnego układania wiązek włókna, a używane pojęcie warstwy w przypadku laminatów nawijanych jest umowne.

Na rysunku 4.5 przedstawiono szczególne przypadki wzorów różniące się między sobą współczynnikami reszty skoku nawijania: $a_a = 0$, $a_b = 0,5$ oraz $a_c = 1$. Są one wykorzystywane podczas nawijania pod dużym kątem $\alpha \approx 90^\circ$ (warstwy obwodowe). Wówczas skok $s = e$, gdzie e jest szerokością wiązki. Takie nawoje nie



Rys. 4.5. Szczególne przypadki wzorów mozaikowych.

Po lewej stronie widoki aksonometryczne; po prawej ich rozwinięcia.

W przedstawionych przykładach takie same są następujące parametry:

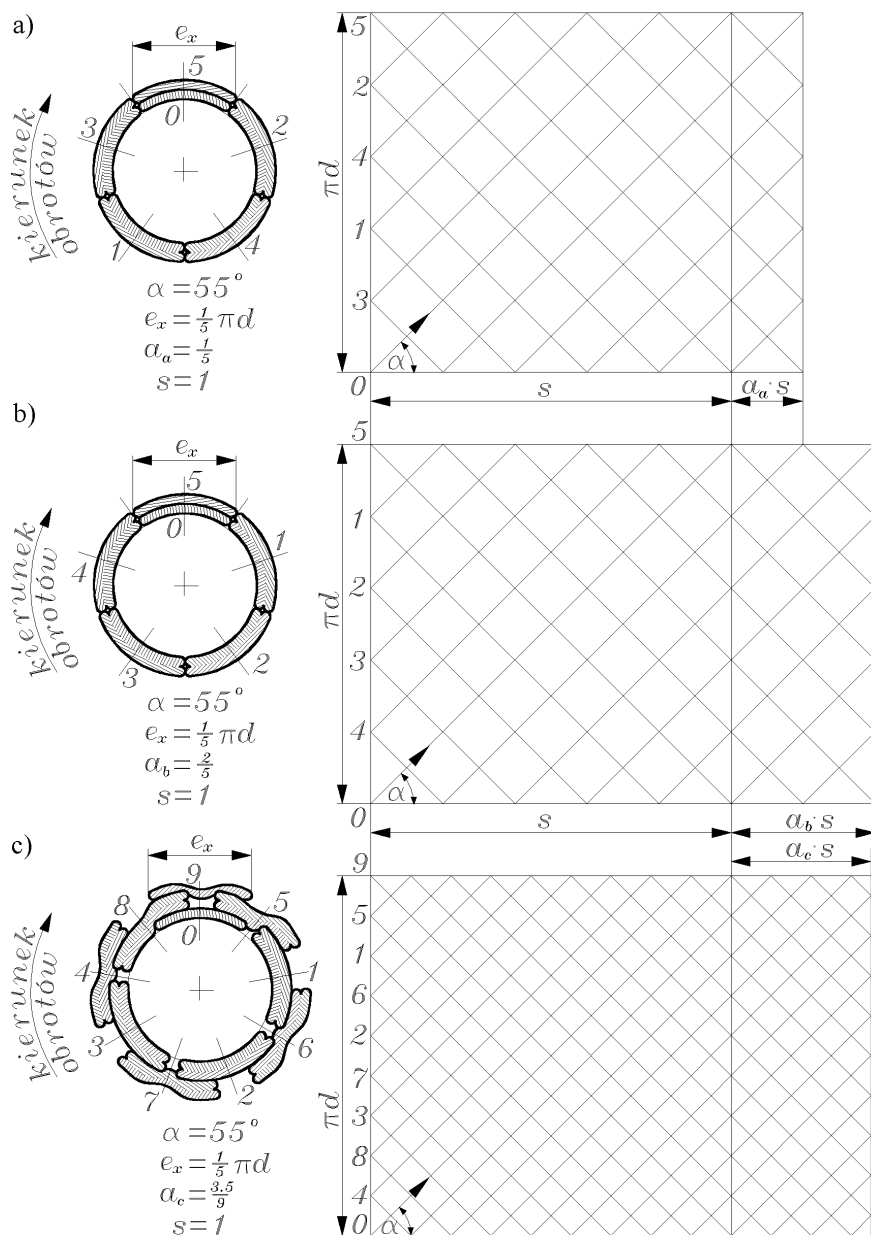
średnica rdzenia d , skok nawijania s i kąt nawijania α .

Różne są jedynie współczynniki reszty skoku nawijania:

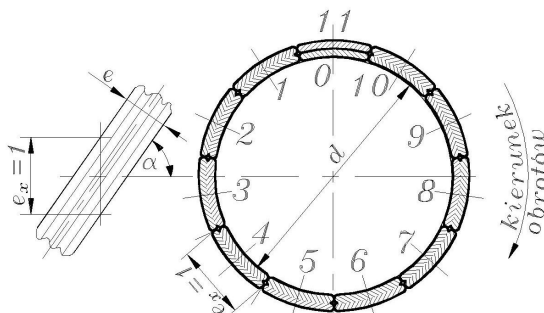
a) $a_a = 0$, b) $a_b = 0,5$, c) $a_c = 1$

mają przeplotów (skok s jest w przybliżeniu równy szerokości wiązki e) i nazywane są obwodowymi.

Wzory z rysunków 4.5 i 4.6 różnią się między sobą jedynie współczynnikami reszty skoku nawijania a . Jeśli przyjmiemy, że nawijanie odbywa się wiązką rowingu szklanego o szerokości w przekroju poprzecznym rdzenia $e_x = \frac{1}{5}\pi d$ (rys. 4.7), to wzory z rysunków 4.6a i 4.6b spełnią warunek równomiernego rozmieszczenia w jednej warstwie. Zmiana współczynnika reszty skoku nawijania na a_c wzoru z rysunku 4.6c doprowadziła do nierównomiernego ułożenia wiązek. W tym przypadku podany warunek równomiernego rozmieszczenia przy szerokości wiązki $e_x = \frac{1}{5}\pi d$ nie jest spełniony. Wzory z rysunków 4.6a i 4.6b na pierwszy rzut oka są takie same, jednak w rzeczywistości jest między nimi różnica jakościowa związana z kolejnością nakładania, to znaczy z położeniem wiązek (która wiązka



Rys. 4.6. Rzuty czołowe wzorów mozaikowych oraz ich rozwinięcia.
 Przedstawione przykłady charakteryzują się takimi parametrami, jak:
 średnicą rdzenia d , skokiem nawijania s , kątem nawijania α , i szerokością wiązki e .
 Różnią się jedynie współczynnikami reszty skoku nawijania a :
 a) $a_a = 1/5$, b) $a_b = 2/5$, c) $a_c = 3,5/9$



Rys. 4.7. Rdzeń z jedenastoma wiązkami włókien (przesycony rowing) rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie oraz widok pojedynczej wiązki szerokości e i e_x w płaszczyźnie przekroju prostopadłego do osi rdzenia. Wiązka nawinięta pod kątem $\alpha = 55^\circ$, wzór mozaikowy z grupy (1, 10, 12, 21)

leży przy rdzeniu pod spodem, a która na wierzchu). Powyższy efekt nazywany jest przeplotem, a powstałe wzory są różne.

Reasumując, parametry nawijania to:

- α – kąt nawijania (np. dla części walcowych butli ciśnieniowych $\alpha = 55^\circ$),
- s – skok nawijania: $s = \pi d / \tan \alpha$,
- a – współczynnik reszty skoku nawijania – wybrany z przedziału $a \in (0, 1)$.

4.2.2. Opis metody tablicowej. Nawijanie cylindrów

Dla projektującego element kompozytowy, który można wykonać metodą nawijania, np. rowingu szklanego na rdzeń, przydatne będzie usystematyzowanie wzorów mozaikowych po to, aby dla konkretnych wymiarów i obciążeń projektowanego elementu można było dobrać z tablicy najlepszy wzór mozaikowy. W celu wyjaśnienia metody tablicowej przeanalizowano przedstawiony przykład:

Przykład 1

Należy wykonać metodą nawijania element rurowy o skończonej długości, który po zaślepieniu końców będzie obciążony ciśnieniem wewnętrznym. Dane:

- obwód $\pi d = 11$,
- kąt nawijania $\alpha = 55^\circ$,
- szerokość wiązki e_x w przekroju poprzecznym rdzenia (rys. 4.7):
 $e_x = e / \cos \alpha = 1$.

Rdzeń w całości ma być pokryty równomierną warstwą przesasyconych wiązek tak, aby został spełniony warunek wzoru mozaikowego. W przeciwnym wypadku powstaną luki i nierówności pokazane na rysunku 4.6c. Liczba pełnych faz ruchu suportu jest równa $\pi d / e_x = 11$. Równomierne rozmieszczenie wiązek zrealizowano jedenastoma fazami przechodzenia suportu (22 nawroty z prawej i lewej strony nawijarki), tak jak to przedstawiono w rzucie osiowym rdzenia na rysunku

N_r	πd	a	$N_p = i-1$	L_p
0	0 - - - - - - - - - 1	0	-	-
1	0 1 ② 3 4 5 6 7 8 9 10 11	1/22	1	80
2	0 ⑥ 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	2/22	5	240
3	0 4 8 1 ⑤ 9 2 6 10 3 7 11	3/22	4	224
4	0 3 6 9 1 ④ 7 10 2 5 8 11	4/22	3	192
5	0 9 7 5 ③ 1 10 8 6 4 2 11	5/22	2	144
6	0 2 4 6 8 10 1 ③ 5 7 9 11	6/22	2	144
7	0 8 5 2 10 7 ④ 1 9 6 3 11	7/22	3	192
8	0 7 3 10 6 2 9 ⑤ 1 8 4 11	8/22	4	224
9	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 ⑥ 11	9/22	5	240
10	0 10 9 8 7 6 5 4 3 ② 1 11	10/22	1	80
11	0 - - - - - - - - - 1	11/22	-	-
12	0 1 ② 3 4 5 6 7 8 9 10 11	12/22	2	80
13	0 ⑥ 1 7 2 8 3 9 4 10 5 11	13/22	3	240
14	0 4 8 1 ⑤ 9 2 6 10 3 7 11	14/22	4	224
15	0 3 6 9 1 ④ 7 10 2 5 8 11	15/22	5	192
16	0 9 7 5 ③ 1 10 8 6 4 2 11	16/22	1	144
17	0 2 4 6 8 10 1 ③ 5 7 9 11	17/22	2	144
18	0 8 5 2 10 7 ④ 1 9 6 3 11	18/22	3	192
19	0 7 3 10 6 2 9 ⑤ 1 8 4 11	19/22	4	224
20	0 5 10 4 9 3 8 2 7 1 ⑥ 11	20/22	5	240
21	0 10 9 8 7 6 5 4 3 ② 1 11	21/22	1	80
22	0 - - - - - - - - - 1	22/22	-	-

Rys. 4.8. Tablica wzorów mozaikowych dla jedenastu przejść suportu. Pogrubiony druk to widok tablicy po uproszczeniu ($a \in (0; 0,25)$). Budując tablicę, kierowano się zasadami: „na przekątnej jedynka” oraz „odległość $0 \longleftrightarrow 1$ jest krokiem w wierszu”.

W okręgach zaznaczono numery wiązek potrzebne do wyznaczenia szeregu wzorów mozaikowych N_p , według liczby przepływów L_p

4.7. Wszystkie możliwe przypadki wzorów mozaikowych zgrupowano w tablicy przedstawionej na rysunku 4.8. Tablica w kolejnych kolumnach zawiera:

- kolejny numer wzoru mozaikowego N_r ,
- obwód rdzenia πd , zapisany w postaci liczb informujących o kolejności wiązek nawijanych na rdzeń – po wstawianiu kolejnych numerów wiązek (0–11) posłużono się zasadą „na przekątnej jedynka”, a następnie wpisywano kolejne liczby w odstępach takich, jakie powstały między zerem i jedynką,
- współczynnik reszty skoku nawijania a wyznaczono z następującej zależności:

$$a = \frac{N_r}{Z} = \frac{N_r}{22} \quad (4.3)$$

gdzie: Z – liczba przejść lub liczba nawrotów suportu (nawroty z prawej i lewej strony nawijarki), w omawianym przykładzie suport wykona 22 nawroty, liczbę nawrotów suportu można również wyznaczyć z zależności: $Z = 2 \times n = 2 \times 11 =$

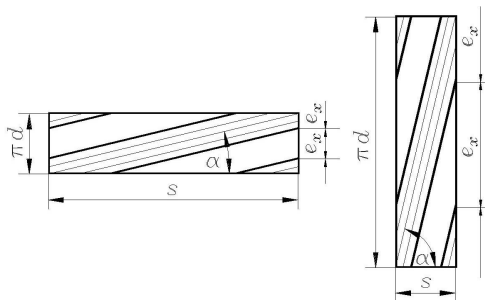
22, gdzie n to największy numer wiązki w warstwie (czyli ostatni); bardziej ogólnie – n jest liczbą podziału obwodu rdzenia ($\pi d/e_x \approx n = 11, n \in N$),

- Np – kolejny numer w szeregu ze względu na liczbę przeplotów podany w przedostatniej kolumnie tablicy,
- liczba przeplotów Lp na długości skoku nawijania s .

Parametry przedstawione w dwóch ostatnich kolumnach tablicy (rys. 4.8), mogą być przydatne w modelowaniu warstw krzyżowych z wykorzystaniem metody tablicowej ze względu na liczbę przeplotów, czyli defektów. Koncepcję tę przedstawiono w punkcie 6.10, str. 126.

4.2.3. Dyskusja nad wynikami

Metodę tablicową można stosować, gdy spełniony jest warunek: $\pi d \geq 2e_x$. Odpowiada on przedziałowi kątów nawijania: $0^\circ < \arctg \frac{2e_x}{s} < 90^\circ$. Te dwa skrajne przypadki zobrazowano na rysunku 4.9.



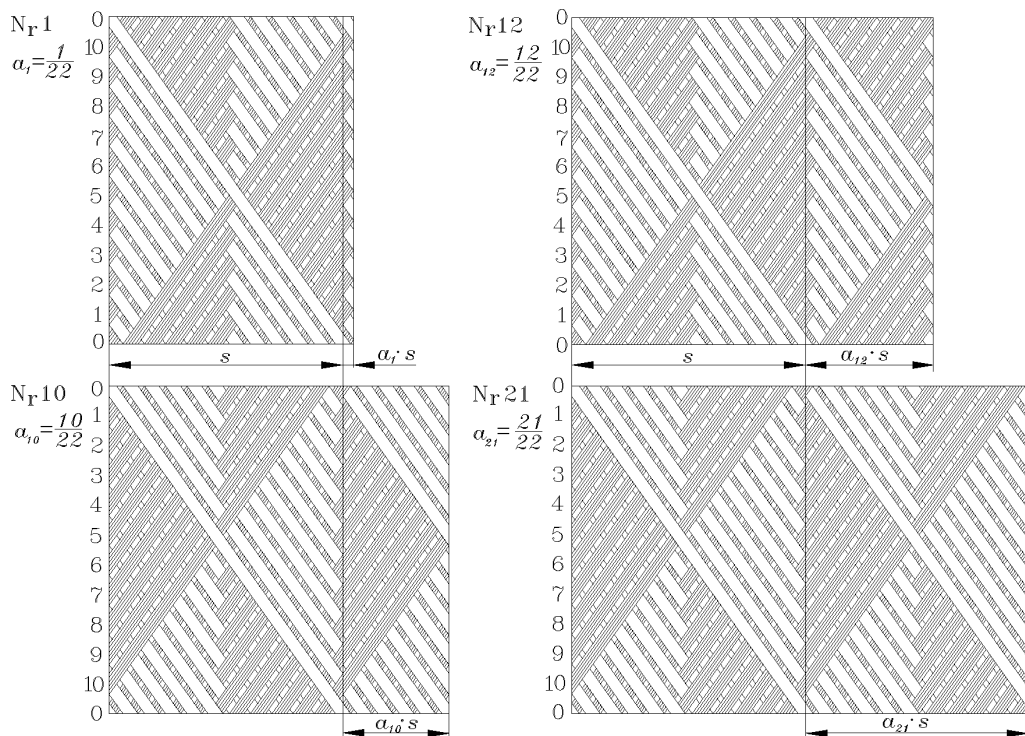
Rys. 4.9. Dwa skrajne przypadki nawijania wiązek włókna ze względu na kąt nawijania α

W metodzie tablicowej dowolny wzór mozaikowy opisują jedynie dwie liczby, np. 11/4 (wielkość tablicy/numer wiersza, lub inaczej: podział obwodu rdzenia/miejsce wiązki w tym podziale). Projektant elementu nawijanego korzysta z tablicy, z której wybiera wzór mozaikowy oraz opisujące wielkości, takie jak współczynnik reszty skoku nawijania a i numer wzoru mozaikowego $N_r(i)$.

Ze względu na współczynnik reszty skoku nawijania a rozróżnia się w tablicy 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 jest widoczny w kolumnie obwodu rdzenia πd . Wzór N_r1 jest w efekcie końcowym taki sam jak 10, 12 i 21, o czym świadczy kolejność liczb w wierszu (rys. 4.8). Różnica jedynie jest taka, że wzory 10 i 21 mają zwrot kierunku narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie przeciwny do



Rys. 4.10. Rozwinięcia wzorów mozaikowych $N_r 1$ grupy (1, 10, 12, 21).
Wzory te są takie same

kierunku obracania się rdzenia (rys. 4.10). Natomiast wzory 1 i 12 mają kierunki narastania kolejnych numerów wiązek na obwodzie zgodne z kierunkami obracania się rdzenia.

Analogiczne podobieństwa odnoszą się do następujących grup wzorów mozaikowych: (2, 9, 13, 20), (3, 8, 14, 19), (4, 7, 15, 18) i (5, 6, 16, 17).

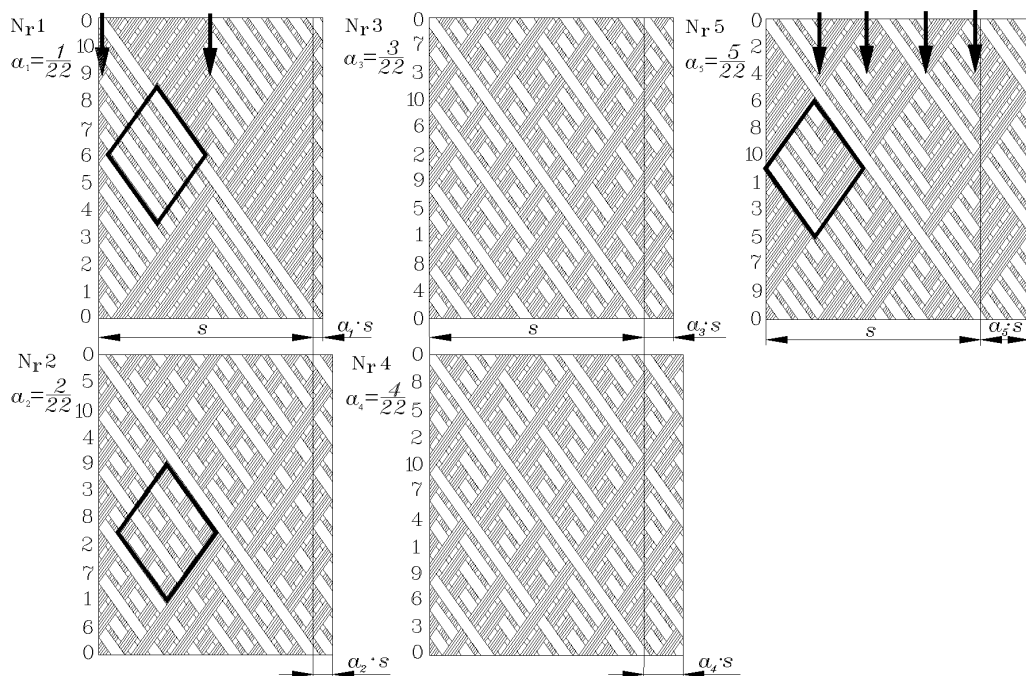
Wzory 0, 11 i 22 są przypadkami szczególnymi – występują one w każdej tablicy wzorów mozaikowych, niezależnie od przyjętej liczby podziału obwodu rdzenia ($\pi d/e_x \approx n = 11, n \in N$). Zostały one przedstawione na rysunku 4.5.

Wiersz w tablicy 11 jest osią symetrii (rys. 4.8) w miejscu, gdzie $a = 0,5$.

Reszty skoków nawijania a wzorów $N_r 10$, $N_r 12$ i $N_r 21$ są odpowiednio dłuższe niż $N_r 1$: $s \cdot (a_{10} - a_1)$, $s \cdot (a_{12} - a_1)$ i $s \cdot (a_{21} - a_1)$ mm (rys. 4.10). Podobnie jest z innymi grupami wzorów mozaikowych.

Podane zależności podobieństw wzorów umożliwiają uproszczenie tablicy, to znaczy zapisanie tylko wierszy spełniających warunek $a \in (0; 0,25)$, co zaznaczono pogrubionym drukiem na rysunku 4.8.

Ze wzorów mozaikowych 1–5 należy wybrać najlepszy, według kryterium najmniejszej liczby przeplotów (dla konstrukcji ciśnieniowych) lub optymalnej długości

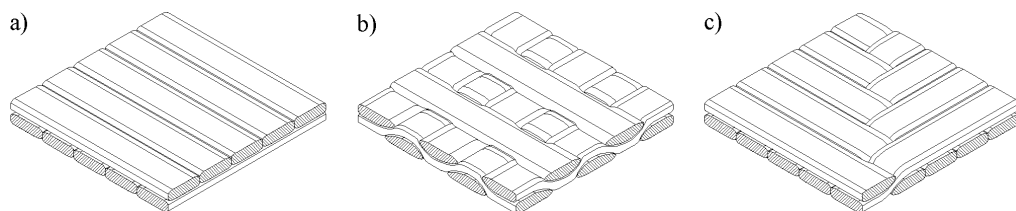


Rys. 4.11. Rozwinięcia wzorów mozaikowych $N_r 1, 2, 3, 4$ i 5 .

Wzmocnienie, jakie dają te wzory jest takie samo ze względu na zawartość włókna wzmacniającego

wiązki zawartej pomiędzy przeplotami (dla konstrukcji skręcanych [28], zginanych, ściskanych itp.). Chodzi o stan naprężenia kiedy niektóre partie wiązek lub wszystkie wiązki są ściskane (wyboczone). Na rysunku 4.11 przedstawiono wzory mozaikowe 1–5, na których można dopatrzeć się różnicy w ułożeniu wiązek, jaka istnieje między nimi. Można zauważyć charakterystyczne romby, których liczba rośnie, a ich rozmiar maleje ze wzrostem liczby przeplotów. Na rysunku 4.12 pokazano widoki aksonometryczne wycinków wybranych wzorów mozaikowych zaznaczonych ramką na rysunku 4.11.

Graficzne zestawienie wszystkich tablic wzorów mozaikowych przedstawiono na rysunku 4.13. Wykres – graficzne zestawianie tablic – jest przydatny do wyznaczania wzoru ze względu na długość nawijania, nastawiania nawijarek łańcuchowych [28, 33], przez wykreślenie w wymaganej odległości a linii pionowej. Zestawienie tablic wykonano, wykorzystując oprogramowanie komputerowe AutoCAD. Jest to związane z dokładnym nanoszeniem punktów zestawienia, a mianowicie: oś pozioma jest skokiem nawijania z podziałem na reszty skoku nawijania a ; oś pionowa przedstawia kolejne tablice uszeregowane 1–50. Oczywiście jest ich więcej, ale raczej nie mają zastosowania praktycznego. Punkty wyznaczone przez



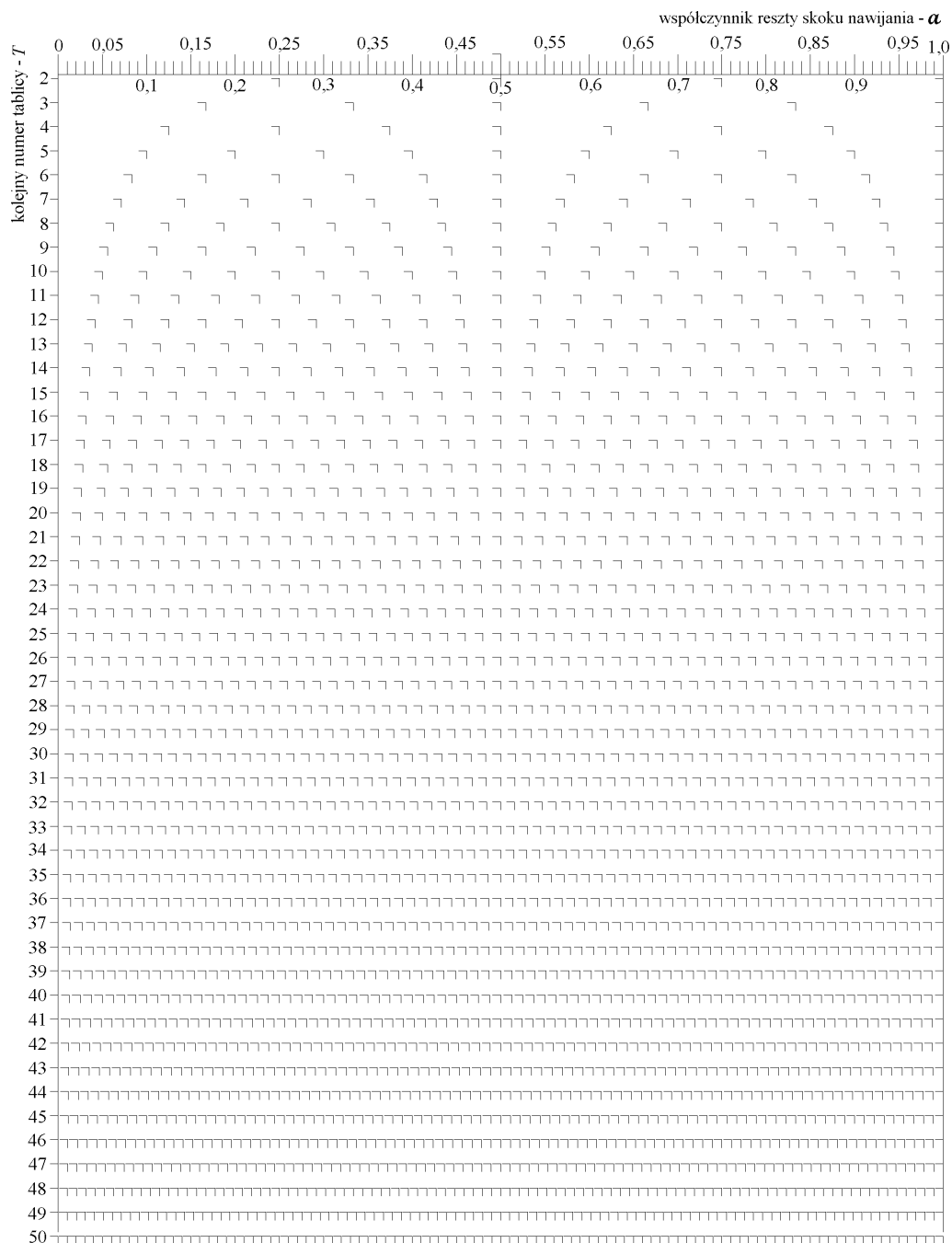
Rys. 4.12. Widoki aksonometryczne wycinków wzorów mozaikowych $N_{r,1}$, 2 i 5 zaznaczonych ramkami w kształcie rombu na rys. 4.11: a) $N_{r,1}$ bez przeplotów, b) $N_{r,2}$ z przeplotami, c) $N_{r,1}$ z charakterystyczną linią przeplotów zaznaczoną strzałkami na rys. 4.11

odwróconą literę „L” (⌋) są wzorami mozaikowymi. Rzut punktu na oś pionową wskazuje numer tablicy, natomiast rzut na oś poziomą wskazuje współczynnik reszty skoku nawijania a . Numer tablicy oraz współczynnik reszty skoku nawijania w pełni określają wzór mozaikowy (por. 4.2.3). Rysunki tablic 2–53 oraz widoki wszystkich wzorów mozaikowych przedstawiono w załączniku do pracy [28].

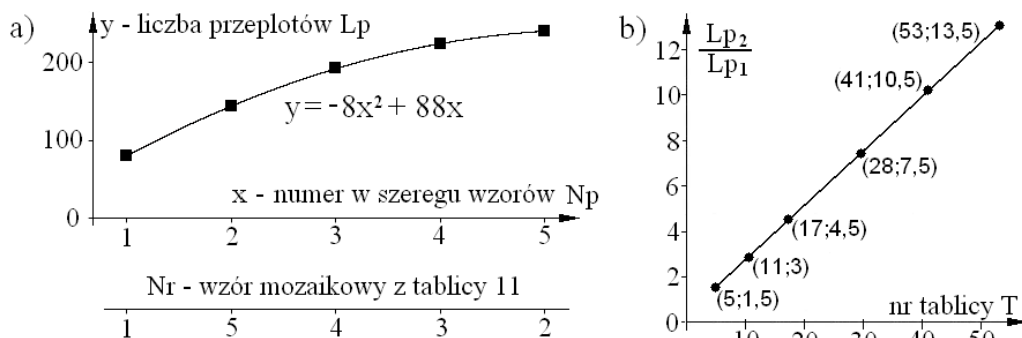
Możliwość korzystania z zestawienia tablicy może być przydatna podczas wyznaczania długości nawijanego elementu, np. butli. Liner ma określoną długość i do tej długości należy dobrać odpowiedni wzór mozaikowy lub lepiej odwrotnie, na podstawie konkretnego wzoru mozaikowego, czy kilku wzorów, można zaprojektować długość linera.

Jeśli wzory mozaikowe zostaną uszeregowane według liczby przeplotów, to pierwszy – Np_1 , zawsze będzie wzorem $N_{r,1}$. Ten wzór oraz kilka następnych z tego szeregu będą zawierały charakterystyczne obszary, które zaznaczono strzałkami na rysunku 4.11 oraz dokładniej na rysunku 4.23 (s. 66). Będą to: linie przeplotów, linie uskoków, punkt centralny i obszary wiązek nieprzeplecionych.

Wracając do szeregu wzorów mozaikowych, to pierwsze z nich, zaczynając od $N_{r,1}$ będą miały wymienione obszary charakterystyczne bardzo wyraźne, natomiast ostatnie z tego szeregu, dostatecznie blisko $N_{r,2}$, nie będą miały obszarów charakterystycznych. Wyjaśniono to na rysunkach 4.11 i 4.14a oraz rys. 6.1 i rys. 6.2, które określają liczby przeplotów w zależności od N_r wzoru mozaikowego. Ostatnim wzorem z tego szeregu, czyli $Np_{\max}$, będzie wzór mozaikowy $N_{r,2}$. Wzory mozaikowe w szeregu według przeplotów, zaczynając od $N_{r,1}$, mają także coraz większą liczbę rombów, punktów centralnych, linii przeplotów i uskoków, a obszary z wiązkami nieprzeplecionymi (romby czy trójkąty) są coraz mniejsze. Ostatni wzór mozaikowy w tym szeregu $Np_{\max}$ – $N_{r,2}$ swoim widokiem w ogóle nie przypomina wzorów z początku szeregu. Ale jego liczba przeplotów $Lp_{\max}$ jest kilkakrotnie wyższa niż liczba Lp_1 przeplotów we wzorze $N_{r,1}$. Jeśli przeplot potraktujemy jako wadę, to przez zastosowanie wzoru $N_{r,1}$ kilkakrotnie zredukujemy ilość wad w porównaniu ze wzorem $N_{r,2}$. Im większa tablica, tym ta redukcja wad proporcjonalnie będzie wyższa. Na rysunku 4.14b przedstawiono liniową zależność numeru tablicy T od



Rys. 4.13. Zestawienie tablic wzorów mozaikowych (oś pionowa) oraz możliwych do zrealizowania wzorów w zależności od współczynnika α (oś pozioma)



Rys. 4.14. Wykresy: a) zależności liczby przeplotów od wzorów uszeregowanych według N_p (od N_{r1} do N_{r2}), b) zależność numeru tablicy T od współczynnika L_{p2}/L_{p1} wyrażającego relację pomiędzy liczbą przeplotów wzorów najbardziej skrajnych – N_{r2} i N_{r1}

współczynnika L_{p2}/L_{p1} wyrażającego relację pomiędzy liczbą przeplotów wzorów najbardziej skrajnych – N_{r2} i N_{r1} . W tablicy $T = 11$, $L_{p2}/L_{p1} = 240/80 = 3$.

Na rysunkach 4.14a oraz 6.2 (s.103) przedstawiono zależność liczby przeplotów od uszeregowanych wzorów mozaikowych od N_{p1} do $N_{p_{max}}$, czyli od N_{r1} do N_{r2} . Dla wszystkich tablic wzorów mozaikowych krzywe wykreślone w ten sposób są tą samą funkcją, którą wyznaczono metodą regresji za pomocą programu komputerowego Microsoft Office Excel. Danymi wejściowymi dla programu aproksymacyjnego były liczby przeplotów policzone z widoków wzorów mozaikowych. Oznacza to, że można wyliczyć dokładną liczbę przeplotów dla każdego wzoru mozaikowego w dowolnej tablicy według zależności:

$$L_{p_i} = 8N_{p_i}(T - N_{p_i}) \quad (4.4)$$

w której:

L_{p_i} – liczba przeplotów w analizowanym wzorze mozaikowym $N_{r,i}$,

N_{p_i} – numer w szeregu wzorów mozaikowych ułożonych według liczby przeplotów z analizowanej tablicy T ,

T – numer analizowanej tablicy.

Trudność stanowi uszeregowanie wzorów mozaikowych i znalezienie numerów N_p . Można posłużyć się następującą zależnością:

$$N_{p_i} = T/N_{r,i} \quad (4.5)$$

gdzie $N_{r,i}$ – analizowany wzór mozaikowy. Wynik tej zależności nie może być liczbą naturalną, zawsze trzeba go zaokrąglić do liczby naturalnej: $\approx N_{p_i} \in N$. Jeśli wynik podanej zależności będzie wynosił dokładnie liczbę naturalną, to taki wzór mozaikowy nie istnieje. Jest to związane z dzieleniem obwodu części walcowej

bez reszty – wiązki nakładają się na siebie, pozostawiając obszary niepokryte lub tworząc następną warstwę. Innym, lepszym sposobem wyznaczenia szeregu wzorów mozaikowych według liczby przeplotów jest korzystanie z wydruku tablicy. Wiersze tablicy są kolejnymi wzorami mozaikowymi. Na przekątnej tablicy znajdują się „jedynki”, czyli pierwsze wiązki ułożone we wzorze mozaikowym. Numery wiązek w wierszu najbliższej tej przekątnej wskazują kolejność w szeregu według liczby przeplotów, ale pomniejszoną o jeden. Numery te ujęto w okręgi na rysunkach 4.8 oraz 6.1. W dodatkowych kolumnach z prawej strony tablic zestawiono numery w szeregu wzorów mozaikowych według liczby przeplotów Np oraz wyliczone liczby przeplotów Lp z zależności 4.4.

Wzór mozaikowy N_r1 zawiera charakterystycznie rozmieszczone przeploty na linii, co zaznaczono strzałkami na rysunku 4.11 oraz bardzo długie odcinki wiązek pomiędzy przeplotami (zliczono 21 wiązek). W miejscach zaznaczonych strzałką na rysunkach 4.11 oraz 4.23 następuje załamanie włókien, co powoduje miejscowe odchylenie ich osi od kierunku występujących w elemencie naprężeń i może stanowić rodzaj karbu. Zaobserwowano także inną właściwość linii zgrupowania przeplotów, mianowicie stanowi ona rodzaj bariery zatrzymującej rozwój długich pęknięć powstałych w obszarach bez przeplotów (dowodzą tego wyniki badań przedstawione w punkcie 5.3, s. 83, dot. badań rur oraz w rozdziale 6 dot. badań butli). W miejscach między strzałkami nie ma przeplotu, co może być przyczyną występowania rozwarstwień elementu. W czasie obciążania, np. ciśnieniem wewnętrznym, na powierzchni rury wykonanej według wzoru N_r1 można zauważyć powstawanie pęknięć wzdłuż włókien pomiędzy strzałkami. Obszar wokół linii przeplotu nie ma pęknięć (rys. 4.24). Jeśli pęknięcie pojawi się na linii przeplotu w wyniku powstania naprężeń krytycznych, będzie to początek zniszczenia.

Współpraca składników kompozytu pod obciążeniem (syciwo oraz przeplecione i sfalowane włókna we wzorach) komplikuje się z powodu tendencji do wyprostowywania się rozciąganych włókien wzdłużnych, występowania momentów skręcających oraz ścinania między wiązkami, co prowadzi do powstawania pęknięć [144]. Wytrzymałość kompozytu wykonanego techniką nawijania związana jest ze zdolnością powstawania i kumulowania pęknięć, natomiast zdolność ta zależy od liczby przeplotów i średniej długości wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ (długość wiązki pomiędzy przeplotami). Wartości $\bar{l}$ dla omawianych przypadków przedstawiono w tabeli 4.1. Długość wiązki nieprzeplecionej wyrażona w szerokości tej wiązki ma większe znaczenie w innym sposobie obciążania, np. w zginaniu, skręcaniu, wtedy niektóre wiązki pracują na ściskanie, wyboczenie, zostało to omówione w innych pracach autora [28]. Po obciążeniu ciśnieniem wewnętrznym długość wiązki nieprzeplecionej nie jest rozpatrywana.

Widoki wzorów mozaikowych podobne są do widoku tkaniny, jednak wzorów wykonanych metodą nawijania nie można porównywać ze strukturą tkaniny. Właściwości laminatów wykonanych metodą nawijania różnią się od właściwości

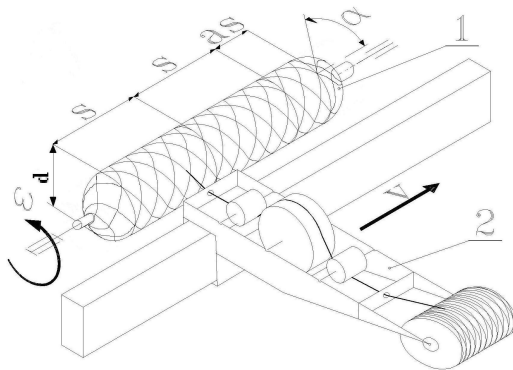
Tabela 4.1. Zestawienie różnic pomiędzy wzorami mozaikowymi (rys. 4.11)

Wzór mozaikowy	Współczynnik reszty skoku nawijania [-]	Liczba przeplotów [-]	Średnia długość wiązki $\bar{l}$ [e]
N_r1	$a_1=1/22$	80	5,81
N_r2	$a_2=2/22$	240	2,0
N_r3	$a_3=3/22$	224	2,14
N_r4	$a_4=4/22$	192	2,49
N_r5	$a_5=5/22$	144	3,39

laminatów wykonanych przez nakładanie kolejnych warstw tkaniny. Różnice te wynikają z tego, że:

- W laminatach wykonanych metodą nawijania nie ma wyraźnej granicy pomiędzy warstwami, tak jak w laminatach z tkaniny. Wynika to z indywidualnego układania wiązek, a używane pojęcie warstwy w przypadku laminatów nawijanych jest umowne i odnosi się do równomiernej sieci powstałej w wyniku nawinięcia wiązki. Taka sieć jest liczona od przyjętego punktu znajdującego się w osi wiązki wyjściowej do punktu również znajdującego się w osi wiązki dokładnie pokrywającej wiązkę wyjściową. Dla niektórych wzorów mozaikowych precyzyjny laminat wykonany metodą nawijania nie musi zawierać pełnej liczby warstw (liczba większa od 1) i nie musi to wpływać na jego wytrzymałość oraz wygląd zewnętrzny.
- Elementarne włókno, np. szklane w tkaninie lub elemencie wykonanym techniką wyplatania, zawiera większą liczbę wad niż włókno użyte do nawijania (pęknięcia, wyszczerbienia, nieciągłości, szlichty włókiennicze i inne). Uszkodzenia takie powstają np. w czasie wykonywania tkanin.
- Podczas nawijania wiązka układana jest z naciągami, natomiast naciągowi wiązki w tkaninie towarzyszy pewna dowolność.
- Pewne kompozytowe elementy konstrukcyjne (takie jak kolanka rurociągów, trójniki, elementy stożkowe i wiele innych) można wykonać metodą nawijania jedną wiązką włókna ciągłego, natomiast nie można ich wykonać z użyciem jednego kawałka tkaniny. Taki element w przypadku tkaniny wykonuje się z wielu kawałków i wtedy użyte włókno jest nieciągłe.

Wymienione problemy wskazują, że właściwości (mechaniczne, elektryczne i inne) elementów nawijanych wiązką włókna ciągłego są bardziej korzystne niż wykonane z tkaniny czy wyplatane. Wymienione właściwości można przenieść również na inne bryły, takie jak kula, stożek, torus i inne. W załączniku do pracy [28] zamieszczono przykładowe rysunki nawijania stożka, kuli i torusa z wykorzystaniem metody tablicowej.



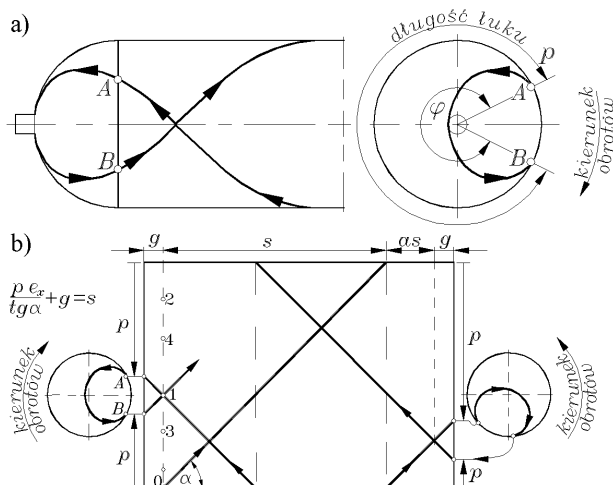
Rys. 4.15. 1 – Nawijana butla z charakterystycznymi parametrami geometrycznymi opłotu: s – skok nawijania, a – współczynnik reszty skoku nawijania, α – kąt nawijania, d – średnica części cylindrycznej, ω – prędkość kątowna ruchu obrotowego butli.
2 – Suport wraz z bębnowym układem nasycającym i szpulą wysokowytrzymałego włókna wzmacniającego (szklanego, węglowego itp.); v – prędkość liniowa suportu

4.2.4. Nawijanie butli

Na rysunku 4.15 przedstawiono schemat nawijania butli, jednak do nawijania butli jako bryły złożonej jest potrzebna nawijarka o liczbie osi równej cztery. Chodzi o cztery niezależne ruchy maszyny. Butle mają kształt walca zaślepionego dennicami sferycznymi, torisferycznymi [161], elipsoidalnymi i innymi, powstałymi przez obrót krzywych tworzących. Jednak w butlach wytwarzanych metodą nawijania, idealna dennica ma kształt izotensoidy – krzywej zapewniającej jednolitą wartość naprężeń w dennicy wzmocnionej włóknem ciągłym naniesionym w procesie nawijania. Technologicznie dennice w butlach kompozytowych są bardziej wzmocnione. W wyniku procesu nawijania odkłada się tam więcej włókna, ma to wpływ na zmianę kształtu dennicy, większe jej spłaszczenie w środku. W Internecie są dostępne darmowe programy do wyznaczania kształtu dennicy jako izotensoidy.

Podczas projektowania wzorów mozaikowych dla butli kompozytowych można również posłużyć się metodą tablicową, podobnie jak podczas nawijania kompozytowych elementów rurowych. W opisanej metodzie rodzaj krzywej tworzącej dennicę nie ma znaczenia. Ważny natomiast jest parametr przeskoku p , to znaczy długość łuku o promieniu $r = d/2$, którego początkiem jest punkt przejścia wiązki z powierzchni walcowej na dennicę, a końcem jest punkt przejścia z dennicy na powierzchnię walcową. Na rysunku 4.16 przedstawiono graficzną ilustrację parametru p . Jest on liczbą całkowitą z przedziału od 0 do $\pi d/e_x$. Jest to iloraz rzeczywistej długości łuku i szerokości wiązki e_x :

$$p = \frac{\pi d}{e_x} \cdot \frac{\phi}{2\pi} = \frac{d \cdot \phi}{2e_x} \quad (4.6)$$



Rys. 4.16. Schemat nawijania butli z pomiarem długości łuku p :

- a) rzuty, osiowy i czołowy dennicy butli,
b) rozwinięcie powierzchni walcowej z rzutami dennic

Zastosowanie metody tablicowej do projektowania oplotu butli przedstawiono w przykładzie 2.

Przykład 2

Wykonać metodą nawijania kompozytową butlę ciśnieniową przedstawioną na rysunku 4.17, z tolerancją długości części walcowej 0,5 cm.

Dane:

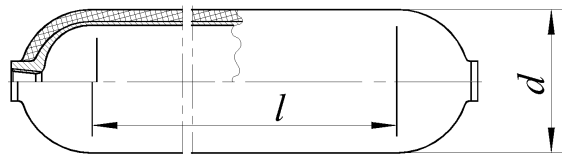
- obwód $\pi d = 11$ cm, gdzie d – średnica butli,
- kąt nawijania $\alpha = 55^\circ$,
- długość części walcowej $l^T = s(k + a) = 15 \pm 0,5$ cm,
gdzie: s – skok nawijania $s = \pi d / \tan \alpha = 7,70$ cm,
 k – liczba naturalna $k \in N$, określająca liczbę skoków $k = 1$,
 a – współczynnik reszty skoku nawijania (wybrany z tabeli wzorów mozaikowych),
- szerokość pasma w przekroju poprzecznym butli

$$e_x = \frac{e}{\cos \alpha} = 1 \text{ cm} \quad (4.7)$$

gdzie e – szerokość pasma (rys. 4.7),

- parametr przeskoju wiązki p określony doświadczalnie dla rozpatrywanej dennicy sferycznej $p = 8$ cm.

Wymienione dane są takie jak w przykładzie omówionym wcześniej dla elementów rurowych (pkt 4.2.2). W związku z tym wykorzystano tablicę z rysunku 4.8. W celu zinterpretowania tablicy dla butli, należy wyznaczyć obliczeniową długość butli



Rys. 4.17. Schemat butli ciśnieniowej, l – długość części walcowej; d – średnica

$L = k' \cdot s + a \cdot s = 3 \cdot s + a \cdot s$ (k' – liczba skoków). Aby wyznaczyć a , podzielono teoretyczną długość butli przez s . Po odjęciu od wyniku części całkowitej ($k' = 3$), otrzymano współczynnik reszty skoku nawijania a :

$$\frac{L}{s} = \frac{26,2}{7,7} = 3,402 \quad (4.8)$$

stąd $a = 0,402$.

Na podstawie współczynnika a wybrano z tablicy wzór mozaikowy $N_{r,9}$, dla którego $a_9 = 9/22 = 0,409$. Zgodnie z punktem 4.2.3 wzór $N_{r,9}$ jest odpowiednikiem wzoru $N_{r,2}$ (przedstawionego na rys. 4.11), a ten z kolei charakteryzuje się największą liczbą równomiernie rozmieszczonych przeplotów. Pozostaje pytanie: czy wzór $N_{r,9}$ ($N_{r,2}$) jest najlepszy dla butli ciśnieniowej. Zgodnie z wnioskami przedstawionymi w rozdziale 7, ten wzór nie jest korzystny. Jednak jako wzór tzw. dwuwarstwowy (por. pkt 4.2.5) może okazać się najlepszy.

Do zakończenia zadania pozostaje sprawdzić czy długość butli mieści się w zadanej tolerancji. W tym celu należy przeprowadzić czynności odwrotne do wyznaczania współczynnika a , ale już z wartością odczytaną z tablicy dla wzorów $N_{r,9}$ – $a_9 = 9/22 = 0,409$:

- zmodyfikowana długość obliczeniowa butli jest równa:

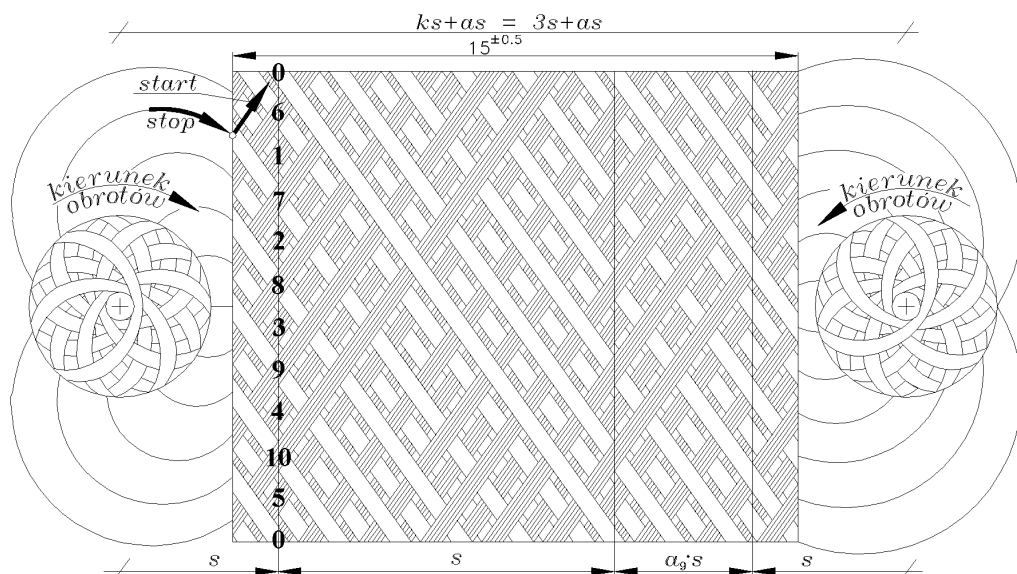
$$L_9 = s \cdot (k' + a_9) = 7,7 \cdot (3 + 0,40909) = 26,25 \text{ cm},$$

- rzeczywista długość części walcowej wynosi:

$$l_9^{0,5} = L_9 - \frac{2 \cdot p \cdot e_x}{\text{tg } \alpha} = 26,25 - 11,2 = 15,05 \text{ cm}.$$

Wyznaczona rzeczywista długość części walcowej $l_9^{0,5}$ z powodzeniem mieści się w zadanej tolerancji $l^{0,5} = 15^{\pm 0,5}$ cm. Na rysunku 4.18 przedstawiono rozwinięcie wzoru dobrane z tablicy dla zadanych wymiarów butli kompozytowej. Ten wzór mozaikowy należy do grupy (2, 9, 13, 20) i został przedstawiony także na rysunku 4.11.

Przedstawiony sposób nawijania butli pod kątem $\alpha \approx 55^\circ$ jest niemożliwy do wykonania w praktyce ze względu na niedostateczne wzmocnienie dennic. Dennica przy króćcu wyjściowym nie będzie pokryta wzmocnieniem. Jednak autor wykonuje dodatkowe wzmocnienie, między innymi z wykorzystaniem tzw. jeży. Tymi sposobami wykonano wiele butli według opisanej metody, a szczegółowe wyniki badań ciśnieniowych tych butli przedstawiono np. w punkcie 6.1 oraz



Rys. 4.18. Rozwinięcie wzoru mozaikowego dobraneo z tablicy (rys. 4.8) dla omawianej butli kompozytowej

w wielu innych pracach autora. Ten sposób działania jest związany z badaniem przez autora tylko części walcowej butli.

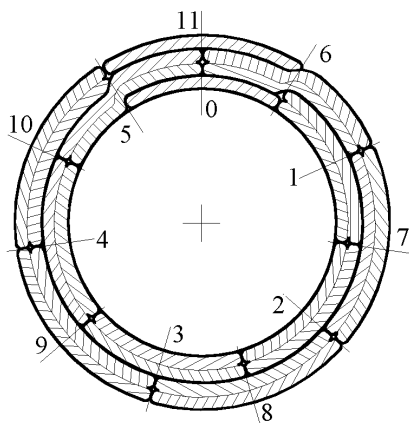
Szczegółowy opis procedury nawijania dennic, w tym izotensoidalnych, zawarto w pracach [11, 141, 142]. Prace te dotyczą procedur projektowania nawijanych zbiorników kompozytowych, obliczania trajektorii wiązek.

4.2.5. Sposoby modyfikacji nawijanych struktur kompozytowych

Niekorzystne efekty związane z liniami przeplotów i uskoków oraz z punktami centralnymi częściowo można ograniczyć przez zwiększenie liczby warstw oraz grubości ścianki kompozytowej, zwiększenie szerokości wiązki e oraz zmniejszenie jej wysokości h (rys. 4.21). Inne pomysły, które nie były badane w pracy, a wydają się skuteczne, to przesunięcia warstw, naprzemienne nawijanie warstw oraz wzory dwuwarstwowe.

Przesunięcia warstw

W celu uniknięcia nakładania się na siebie efektów spiętrzenia naprężeń na liniach uskoków i przeplotów należy, po nawinięciu jednego wzoru mozaikowego (jednej warstwy), przesunąć oczko (punkt wyjścia wiązki z suportu na rdzeń) wzdłuż osi elementu nawijanego o $1/4$ skoku nawijania lub w taki sposób, aby wiązka kolejnej warstwy leżała na linii styku wiązek warstwy dolnej. Po nawinięciu drugiej warstwy należy powrócić do punktu, z którego nawijano warstwę pierwszą itd.



Rys. 4.19. Struktura wzoru dwuwarstwowego (jedna warstwa)
 tzw. muru ceglanego w rzucie czołowym. Wzór 11/2, przedstawiciel grupy (2, 9, 13, 20).
 Szerokość wiązki $e'_x = 2e_x$

Naprzemienne nawijanie warstw

Wiązki wzmocnienia będą lepiej ze sobą związane, jeśli będą biegły równolegle, a nie pod kątem do siebie pomiędzy warstwami (wzorami), tzn. wiązki w górnej części wzoru będą przykryte kolejnym wzorem, ale z wiązkami u dołu ułożonymi pod tym samym kątem. Do wyjaśnienia posłużono się obrazem z rysunku 4.10. Chodzi o naprzemienne nawijanie wzorów N_r1 lub N_r12 na wzór N_r10 lub N_r21 itd. Pomiędzy wzorami (warstwami) uzyska się lepsze związanie, ponieważ wiązki w warstwach nakładanych na siebie będą równoległe, a w samych warstwach pewien rodzaj związania zapewnia linia przeplotów. W ten sposób można uzyskać materiał bardziej spójny.

Wzory dwuwarstwowe

Sposób na uzyskanie efektu „muru z cegieł” polega na wybieraniu wzorów mozaikowych składających się z dwóch warstw. Po nawinięciu jednej warstwy oś wiązek drugiej układa się dokładnie na linii styku wiązek warstwy pierwszej. Jeśli na tym wzorze mozaikowym zostanie nawinięty drugi taki sam, a na niej następny itd., to uzyskana struktura w przekroju promieniowym będzie przypominać wiązanie muru z cegieł (rys. 4.19). Tablicę wzorów dwuwarstwowych wykonuje się tak samo jak dla jednowarstwowych. Wtedy szerokość wiązki przyjmuje się dwa razy mniejszą – $e_x = e/2 \cdot \cos \alpha$. Warunek stosowalności metody tablicowej $\pi d \geq 2e_x$ przyjmie postać $\pi d \geq e \cos \alpha$. Najlepszym wzorem dwuwarstwowym jest N_r2 , ponieważ początkowo wiązki układają się podobnie jak w zwykłym, pojedynczym wzorze N_r1 , to znaczy jedna obok drugiej i po wypełnieniu powierzchni rdzenia następuje kolejne ułożenie wiązek, ale już przesuniętych o $e_x/2$, jak w murze z cegieł powstaje zakładka (rys. 4.19). Wzór N_r2 w zastosowaniu dwuwarstwowym ma najmniej przeplotów. Przedstawiony przykład nawijania butli w punkcie 4.2.4 (s. 56), a także wzory grupy

(2, 9, 13, 20) są dwuwarstwowe, pod warunkiem nawijania wiązką dwa razy szerszą. Na rysunku 4.19 przedstawiono rzut czołowy wzorów grupy (2, 9, 13, 20), ale jest on nawinięty wiązką szerokości $e'_x = 2e_x$; na podobnych zasadach można wyznaczać wzory o większej liczbie warstw. Podczas analizy wzorów mozaikowych dwuwarstwowych nasuwa się pytanie, czy można wykonać wzór $N_r 1$ jako dwuwarstwowy. Jest to możliwe, ale wiązki będą zawierać włókna bardzo pozginane, z odchyleniami ułożenia włókien od kierunku naprężeń głównych elementu, zwłaszcza na liniach zgrupowania przeplotów. Każda wiązka będzie układana na wiązce nawiniętej w poprzednim przejściu, tzn. że na uskoku. Może także nastąpić różne zapotrzebowanie na włókno w czasie nawijania w wiązce. Jedna strona wiązki będzie pokrywać w połowie $-e_x/2$ wiązkę nawiniętą w poprzednim przejściu, czyli będzie nawijana na większej średnicy, a druga strona wiązki nie. Może to być przyczyną falowania wiązki i powstawania różnego naciągu we włóknach. Jak zaznaczono we wnioskach pracy (rozdz. 7) najlepszy efekt wzmocnienia uzyskuje się w strukturach, w których wzory mają najmniejszą liczbę przeplotów oraz wiązki są równoległe.

W pracy autora [28] przedstawiono inne użyteczne możliwości wykorzystania tablicy wzorów mozaikowych w metodzie nawijania. W szczególności przedstawiono możliwości nawijania innych brył obrotowo-symetrycznych, takich jak kula, stożek i torus. Przedstawiono przykład wyznaczania długości wiązki potrzebnej do nawinięcia butli, ocenę zużycia materiałowego oraz przykład obliczania analitycznego wytrzymałości elementów nawijanych.

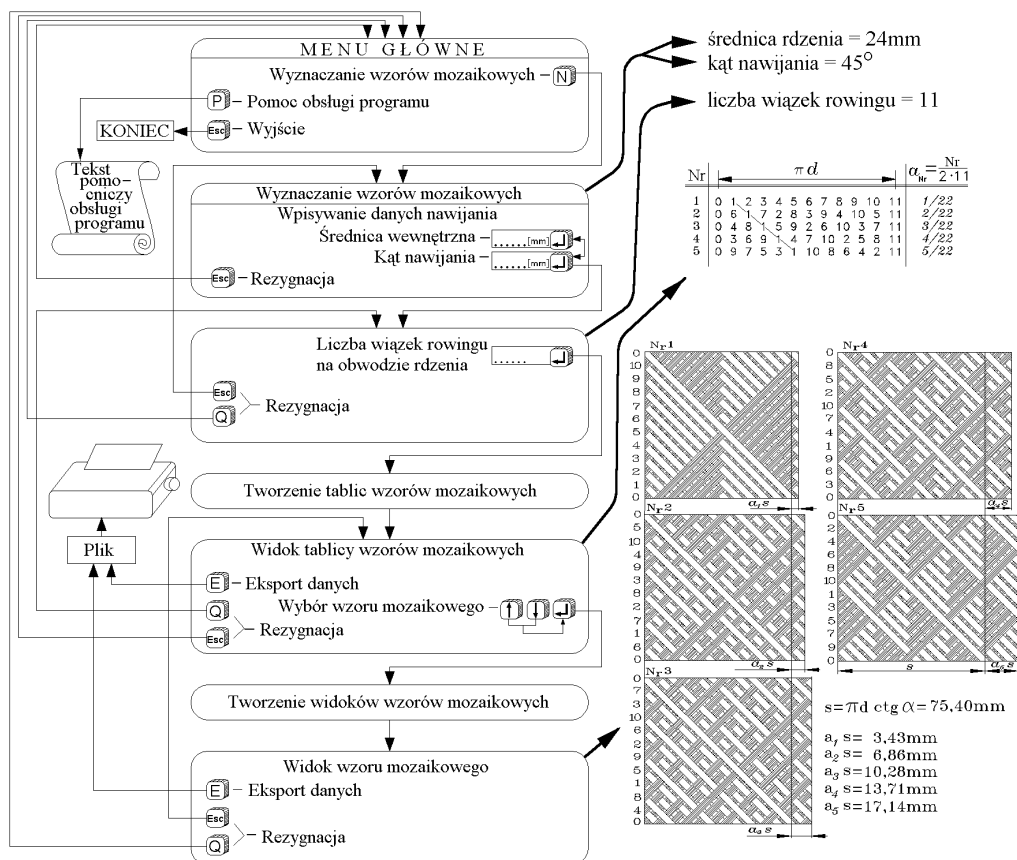
4.2.6. Program komputerowy do wyznaczania wzorów mozaikowych

W celu ułatwienia selekcji wzorów mozaikowych wykonano program komputerowy [24], według zasad i algorytmu przedstawionego w niniejszym rozdziale. Program wykonano w języku Turbo Pascal 7.0, którego funkcjonalny schemat blokowy przedstawiono na rysunku 4.20. Obecnie w IMiMT wykorzystuje się nową wersję tego oprogramowania pracującego w środowisku Windows, co przedstawiono w opublikowanych pracach z udziałem autora [58, 67]. Zadaniem programu jest wygenerowanie tablicy wzorów mozaikowych w sposób wyczerpujący dla danej liczby wiązek wzmocnienia. Istotne jest również to, że program ten podaje parametry techniczne niezbędne do wykonania elementu, przeprowadza wizualizację wzoru.

Po uruchomieniu programu należy podać następujące dane wejściowe:

- średnicę elementu rurowego – d [mm],
- kąt nawijania – α [°],
- liczbę wiązek rowingu na obwodzie rdzenia – n [–].

Po wprowadzeniu podanych danych na monitorze zostaje wyświetlona tablica wzorów mozaikowych. Używając kursorów (górną-dół), można wybrać z przedstawionej tablicy dowolny wzór. Po potwierdzeniu na monitorze zostanie przedstawiony sposób powstawania wybranego wzoru według zadanych parametrów. Program



Rys. 4.20. Funkcyjny schemat blokowy programu do wyznaczania tablic oraz kreślenia wybranych wzorów mozaikowych wraz z ich parametrami takimi, jak: liczba przeplotów L_p , numer w szeregu według przeplotu N_p , średnia długość wiązki nieprzeplecionej l_i itd.

generuje kody do sterowania nawijarką w systemie CNC; za pomocą tej nawijarki wytwarzano butle i rury do badań w ramach tej pracy.

4.2.7. Podsumowanie analizy geometrii nawijania za pomocą metody tablicowej

Tablica wzorów mozaikowych charakteryzuje się następującymi zaletami:

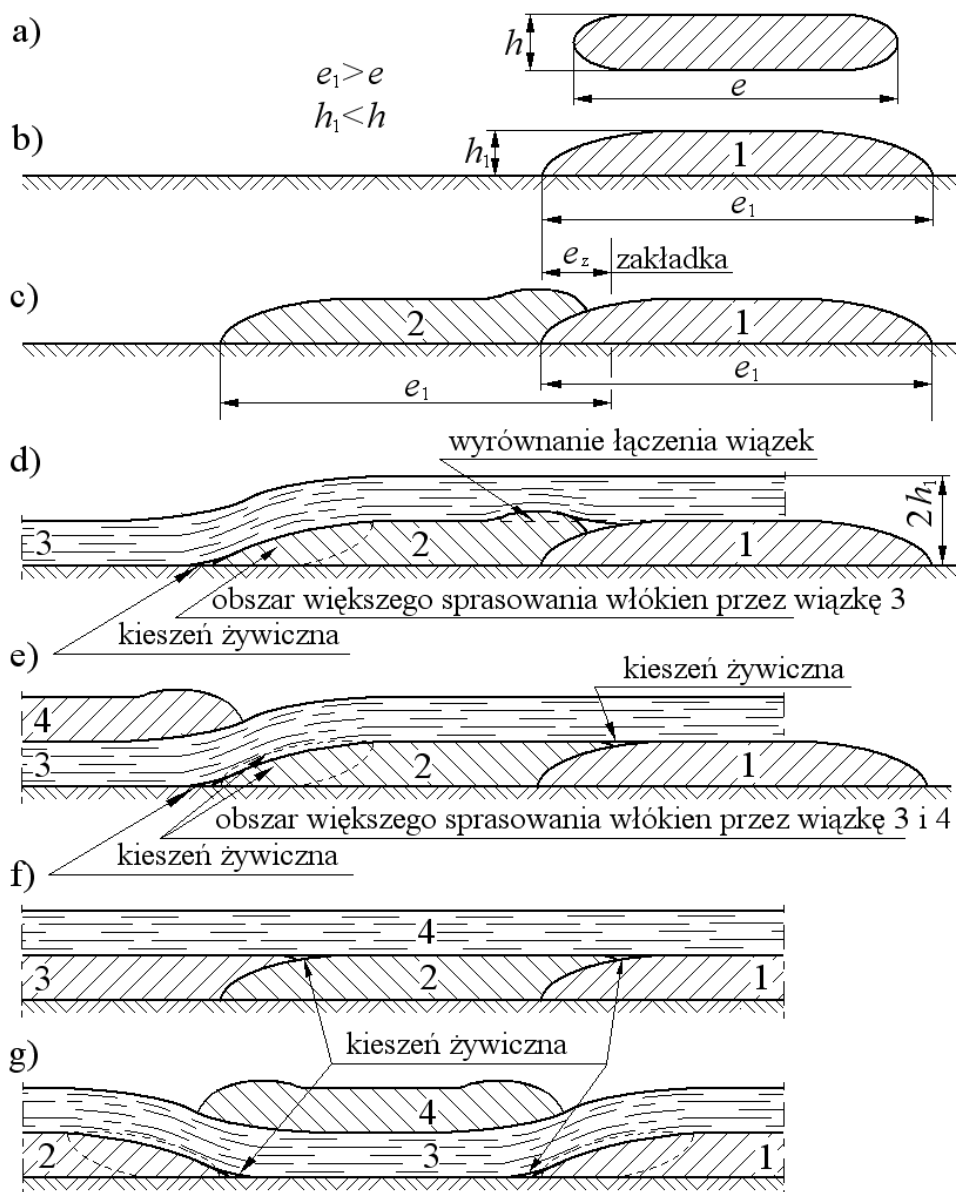
1. Podaje wszystkie możliwe do wykonania wzory mozaikowe dla przyjętej liczby naturalnej podziału obwodu rdzenia (szerokości wiązki e_x), wyznaczonej z zależności $n = \pi d / e_x$ (np. $n = 11$ – por. s. 46).

2. Do określenia wzoru mozaikowego wystarczą jedynie dwie liczby: numer tablicy oraz numer wzoru – T/N_r , zapisane w postaci, np. 11/3. Z tak przedstawionych liczb wyznacza się współczynnik reszty skoku nawijania $a = 3/(2 \cdot 11) = 3/22$ (rys. 4.8, s. 47).
3. Po zastosowaniu metody tablicowej musi być spełniony warunek: $\pi d \geq 2e_x$. Wtedy kąt nawijania α zawiera się w przedziale: $0^\circ < \arctg \frac{2e_x}{s} < 90^\circ$.
4. Kąt nawijania α nie ma wpływu na wygląd tablicy, jest ona uniwersalna dla wszystkich kątów nawijania.
5. Kąt nawijania jest związany ze skokiem nawijania s , który wyznacza długość nawijania – obszar wzoru mozaikowego (rys. 4.9, s. 48).
6. Umożliwia w szybki sposób ocenić i wybrać najlepszy wzór ze względu na średnią długość wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ (długość wiązki pomiędzy przeplotami), liczbę przeplotów, a także wymaganą długość nawijanego elementu kompozytowego, stopniowaną współczynnikiem a .
7. Ułatwia precyzyjne wyznaczenie liczby przeplotów za pomocą zależności 4.4.
8. Umożliwia uzyskanie większego wzmocnienia przez przesunięcia warstw, naprzemienne nawijanie warstw oraz wzory dwuwarstwowe.

4.2.8. Kinetyka powstawania przeplotów

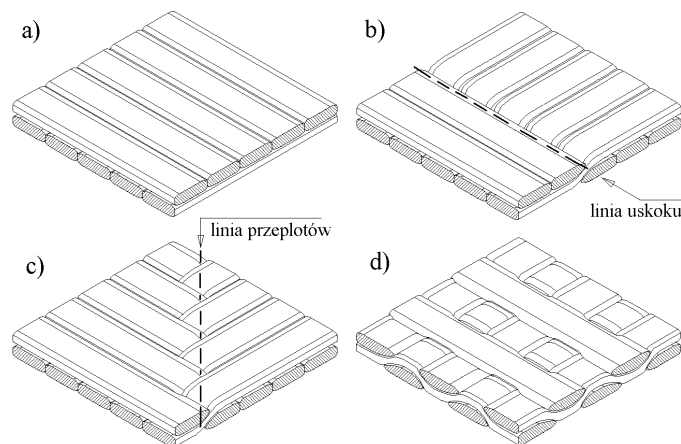
Na rysunku 4.21 przedstawiono kinetykę powstawania charakterystycznych miejsc wzorów mozaikowych o małej liczbie przeplotów – np. N_r1 i dużej liczbie przeplotów – N_r2 . Podczas nawijania na mokro wiązka nasasyconych włókien ma przekrój taśmy, a dokładniej wydłużonego owalu (rys. 4.21a). Po nawinięciu pierwszej wiązki na rdzeń następuje jej nieznaczne rozplaszczanie oraz zmniejszenie grubości, tak jak przedstawiono na rysunku 4.21b. Szerokość wiązki nieznacznie wzrasta do e_1 , a wysokość h maleje do h_1 . Następne etapy nawijania to położenie wiązki równoległej z zakładką e_z albo wiązki poprzecznej. Wiązka równoległa z zakładką e_z (rys. 4.21c) powinna być tak dobrana, żeby powstałe miejsce łączenia dwóch wiązek były równe i jednolite. Nawinięcie wiązki poprzecznej (rys. 4.21d)) powoduje powstawanie pierwszych wad związanych z kieszeniami żywicznymi oraz sprasowaniem włókien w obszarach zaznaczonych na rysunkach. Na rysunku 4.21e przedstawiono sytuację po nawinięciu wiązki 4, która powoduje zmniejszenie kieszeni żywicznej, ale i większe sprasowania włókien w zaznaczonym obszarze. Jeśli w kieszeni żywicznej pojawiły się pęcherze powietrza, to już nie uda się im opuścić tego miejsca. Taki przeplot we wzorze mozaikowym N_r1 znajduje się na liniach uskoków, jeden obok drugiego (rys. 4.22b) oraz na linii przeplotów jeden za drugim, ale odwrócony na przemian o 90° (rys. 4.22c).

Z badań doświadczalnych autora wynika, że pod obciążeniem ciśnieniem wewnętrznym wpływ linii uskoków na lokalne odkształcenia w materiale kompozytowym jest znacznie większy niż w okolicy linii przeplotów. Poza liniami przeplotów wiązki ułożone są jak na rysunku 4.21f i 4.22a. Pod działaniem ciśnienia wewnętrznego



Rys. 4.21. Tworzenie się przeplotów wiązek w czasie nawijania:

- a) kształt i wymiary wiązki przed ułożeniem na linerze, b) kształt i wymiary pierwszej wiązki po nawinięciu na liner, c) ułożenie drugiej równoległej wiązki z zakładką, d) ułożenie trzeciej wiązki poprzecznej i powstanie przeplotu z lokalnymi miejscami charakterystycznymi – wadami, e) ułożenie wiązki 4 i powstanie kolejnych wad oraz pogłębienie wad poprzednich, f) ułożenie wiązek bez przeplotów, g) ułożenie wiązek z przeplotem jak we wzorze $N_{r,2}$, (rys. 4.22d)



Rys. 4.22. Schemat czterech charakterystycznych obszarów we wzorach mozaikowych:

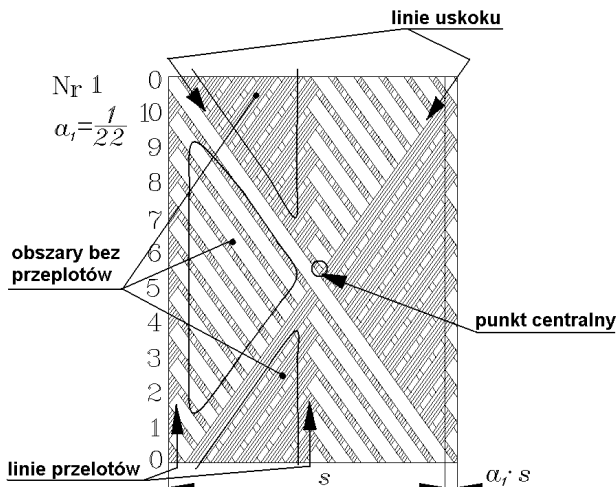
- a) obszar bez przeplotów, b) linia uskoków, c) linia przeplotów,
d) obszar o największej liczbie przeplotów we wzorze mozaikowym $N_r,2$

nego wiązki są rozciągane bez powodowania lokalnych zmian odkształceń czy koncentracji naprężeń jak w scharakteryzowanych przeplotach.

We wzorach mozaikowych $N_r,2$ (rys. 4.21g oraz 4.22d) sytuacja o wiele bardziej się komplikuje. Wiazki, podobnie jak we wzorze $N_r,1$, są nawijane z tym samym naciągiem. Ma to szczególne znaczenie podczas nawijania wiązki 3 i 4. Powstałe kieszenie żywiczne są znacznie większe w porównaniu do $N_r,1$ oraz lokalne obszary sprasowane w wiązce 1 i 2 też są większe. Dowodzą tego wyniki badań przedstawione w rozdziale 6. We wzorze $N_r,1$ tylko w punkcie centralnym występuje tak niekorzystny przeplot (rys. 4.23). Takich punktów centralnych przybywa we wzorach uszeregowanych zgodnie z liczbą przeplotów od $N_r,1$, aż do osiągnięcia wzoru o największej liczbie przeplotów – $N_r,2$, gdzie cała powierzchnia tego wzoru jest poprzepłataną (rys. 4.21g i 4.22d).

W pracy [205] zaproponowano stosunek szerokości wiązki e do wysokości h jako 8, autorzy [136, 164, 165] podają 6–10. Natomiast w badaniach autora przedstawionych w punkcie 1.1 wiązki zbiorników handlowych charakteryzowały się stosunkiem e do h , większym niż 20. Efekt opisanego negatywnego wpływu przeplotów można osłabić przez nawijanie cieńszą (zmniejszyć wysokość h) i szerszą wiązką (zwiększyć e). We wzorze przeplotów będzie mniej, a przeplecione wiązki mniej wygięte, odchylone od kierunku działających obciążeń.

Podane opisy powstawania przeplotów oraz powstawania lokalnych wad, kieszeni żywicznych, sprasowania włókien, lokalnego odchylenia zakrzywionych włókien od kierunku panujących naprężeń itp. potwierdzają wyniki przeprowadzonych badań autora przedstawionych w następnych rozdziałach.

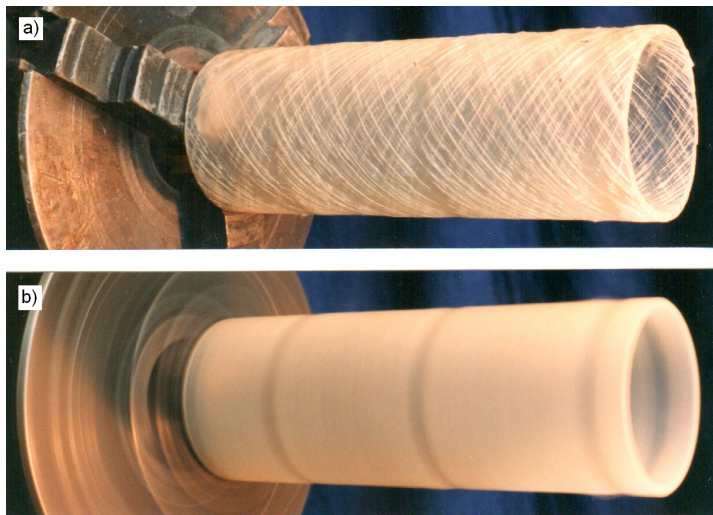


Rys. 4.23. Szkic wzoru mozaikowego $N_r 1$ z zaznaczonymi obszarami charakterystycznymi

4.2.9. Charakterystyka wzoru mozaikowego $N_r 1$

Wzory mozaikowe $N_r 1$ charakteryzują się największymi tzw. rombami na powierzchni cylindra, których jest jeden na długości skoku nawijania s (rys. 4.23). Inne nazwy wzoru $N_r 1$ to wzór rombowy, choinkowy czy diamentowy. Nazwy te powstały ze względu na jego charakterystyczny wygląd, w którym można wyodrębnić romby czy diamenty oraz charakterystyczną choinkę na linii zgrupowania przeplotów. Wzór mozaikowy $N_r 1$ w porównaniu z innymi powstaje w wyniku nawijania jednej wiązki przy drugiej, aż zostanie pokryta cała powierzchnia rdzenia. W tym wzorze (rys. 4.23) można wyodrębnić następujące charakterystyczne obszary:

1. **Obszary bez przeplotów**, wiązki ułożone są równoległe do siebie, pod kątem nawijania $\pm\alpha$; wiązki dolne i górne.
2. **Linie zgrupowania przeplotów**, inne wzory też zawierają linie zgrupowania przeplotów, ale te linie cyklicznie mają przerwy w zależności od wzoru. Linia przeplotów we wzorze $N_r 1$ zawiera tylko jedną taką przerwę na skrzyżowaniu pierwszej i ostatniej wiązki ($\pm\alpha$) – w punkcie centralnym.
3. **Punkt centralny** – skrzyżowanie pierwszej i ostatniej nawiniętej wiązki ($\pm\alpha$) oraz linii zgrupowania przeplotów; jest to najbardziej wyężone miejsce obciążonego elementu nawijanego (rury, butli itp.).
4. **Linie uskoku** – krzyżują się w punkcie centralnym pod kątem nawijania ($\pm\alpha$). Na tych liniach wszystkie wiązki poprzeczne przechodzą z części górnej warstwy pod spód. Następuje skokowa zmiana właściwości materiału na tym kierunku, ponieważ wiązki zostały ugięte, odchylone lokalnie od kierunku

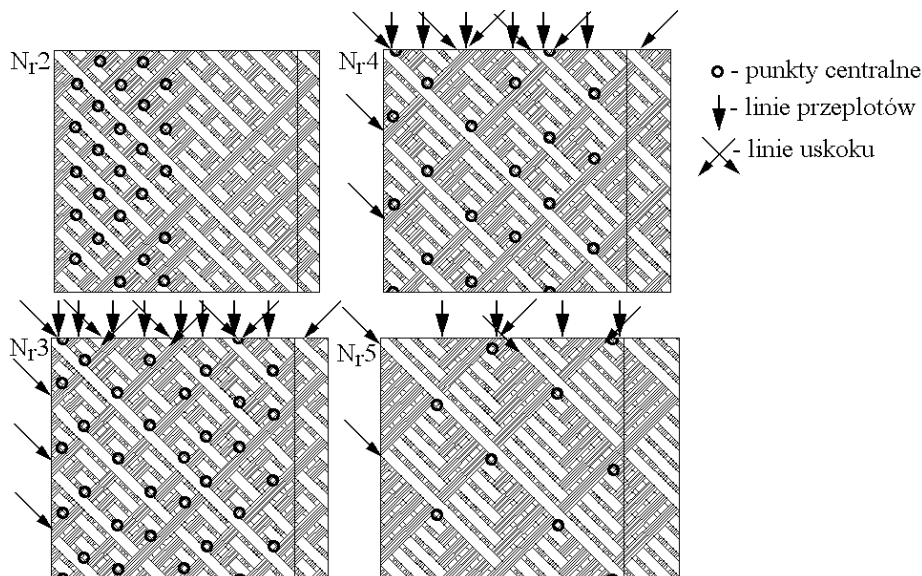


Rys. 4.24. Widok rury wykonanej z syciwa przezroczystego o strukturze N_r1 po badaniach ciśnieniowych, zamontowanej we wrzecionie tokarki:
 a) układ statyczny; widoczne pęknięcia w ścianie rury, b) układ wirujący ułatwia odróżnienie obszarów pomiędzy liniami przeplotów bogatych w pęknięcia (jasne pola) od miejsc niepopękanych na liniach przeplotów [28]

naprężeń głównych. Zniszczenie elementu nawijanego z wzorem N_r1 następuje właśnie w punkcie centralnym i propaguje wzdłuż linii uskoku.

W pewnym sensie linie zgrupowania przeplotów, punkt centralny i linie uskoku są defektami wzoru N_r1 . Inne wzory zawierają też takie defekty, ale nie są one tak zgrupowane i wyraźne jak w N_r1 .

Na rysunku 4.24a, przedstawiono odcinek rury po badaniach ciśnieniowych. Rurę wykonano według wzoru mozaikowego N_r1 z syciwa przezroczystego. Na ekspozycji widoczne są długie i licznie występujące pęknięcia. Jednak w obszarach zaznaczonych strzałkami na rysunku 5.9a (na liniach zgrupowania przeplotów) pęknięcia nie występują. W celu lepszej obserwacji tego stanu rurę zamontowano we wrzecionie tokarki i wprowadzono w ruch obrotowy (rys. 4.24b). Widać, że pęknięcia nie przechodzą przez linie zgrupowania przeplotów (ciemniejsze pasy na obwodzie). Przeploty są swoistą barierą dla pojawiających się pęknięć. Jeśli pęknięcie pojawi się na linii przeplotu w wyniku powstania naprężeń krytycznych, jest to początek zniszczenia rury. Taki stan obserwowano w czasie badań rur opisanych w punkcie 5.3. Zniszczenie rur z wzorem N_r1 następowało na linii zgrupowania przeplotów. Na ekspozycji przedstawionym na rysunku 4.24, nie zauważono koncentracji pęknięć na liniach uskoku czy w okolicy punktu centralnego; próbka była popękana równomiernie.



Rys. 4.25. Wzory mozaikowe z tablicy 11 bez N_r1 (por. z rys. 4.23 oraz 4.11)

4.2.10. Charakterystyka wzorów mozaikowych w porównaniu do N_r1

Pozostałe wzory z tablicy 11 (rys. 4.11) w porównaniu z N_r1 mają więcej punktów centralnych, linii przeplotów i uskoków oraz mniejsze obszary bez przeplotów (rys. 4.23). Wzór N_r5 ma 8 punktów centralnych na czterech liniach przeplotów oraz czterech liniach uskoków (rys. 4.25). Jest to dwa razy więcej niż we wzorze N_r1 . Następne wzory mają jeszcze więcej punktów centralnych, linii przeplotów i uskoków (por. z rys. 6.1). Najwięcej ma ich wzór N_r2 , który nie ma obszarów bez przeplotów. Wielu badaczy traktuje wszystkie wzory, w których można wyróżnić romby, jako wzór N_r1 . Jednak linie uskoków czy przeplotów są inne, ponieważ mają odpowiednio więcej punktów centralnych – na wierzchołkach każdego rombu, które są pewnym brakiem związania nawiniętego włókna pod kątem $+\alpha$ i $-\alpha$ w ramach jednego wzoru. Dlatego rozwój pęknięć typu splitting i rozwarstwienia oraz końcowe zniszczenie elementu przebiega łatwiej niż w materiałach ze wzorami N_r1 .

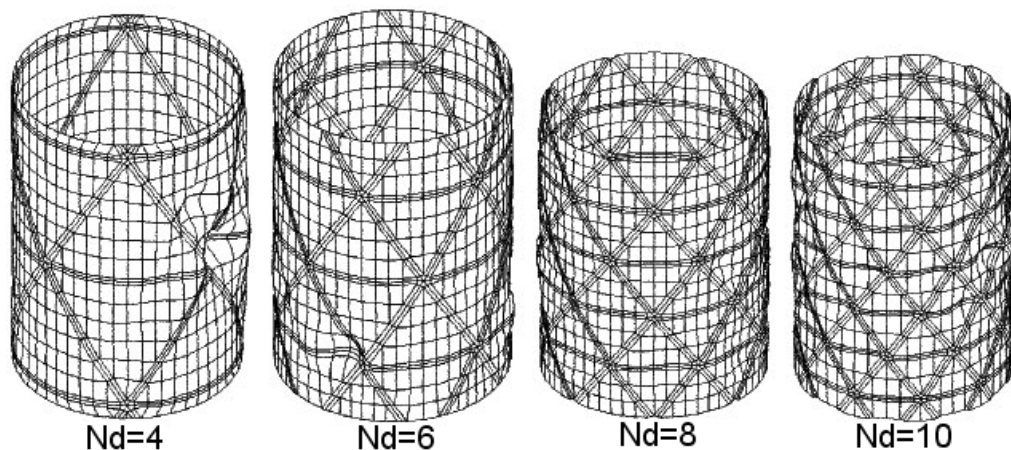
5. Przegląd literatury

W niniejszym rozdziale zaprezentowano przegląd literatury związanej z badaniami wzorów mozaikowych oraz wyniki prac własnych także w odniesieniu do wyników uzyskanych przez innych badaczy. Niestety, literatura krajowa jest dość uboga na ten temat, znaleziono jedynie dwie prace [153, 166], które szczegółowo omówiono w [28].

5.1. Literaturowe przykłady badań wzorów mozaikowych

Zagadnienia dotyczące liczby i rozmieszczenia przeplotów we wzorach mozaikowych są coraz bardziej zgłębiane przez wielu badaczy. Do niedawna lista prac była bardzo uboga, ponadto poruszały one jedynie problem nawijania i jego algorytm [48, 89, 104, 135, 151, 166, 183, 185, 188, 198]. Obecnie producenci kompozytowych elementów nawijanych, w tym zbiorników, mają świadomość istoty doboru wzorów mozaikowych kompozytowej warstwy nośnej zbiornika. Wielu badaczy struktur nawijanych wykazało znaczenie problemu zróżnicowanej pracy pod obciążeniem nawijanego materiału kompozytowego charakteryzującego się różnorodnymi wzorami mozaikowymi w warstwach krzyżowych. Wśród dostępnych wyników badań wnioski i spostrzeżenia są podzielone. Niektórzy z badaczy określają wzory N_r1 (diantowe) jako mniej wytrzymałe i generujące pęknięcia, a inni przeciwnie. Formułowane wnioski są związane z liczbą i wielkością rombów znajdujących się na obiektach badań testowanych przy różnych obciążeniach (skręcanie, zginanie, zgniatanie, ciśnienie wewnętrzne lub zewnętrzne), a także na wynikach modelowania np. MES, które bardzo często są odmienne od uzyskanych wyników badań eksperymentalnych. Także wstępne wyniki badań autora dowodzą, że dobór wzoru mozaikowego jest związany z przyszłym obciążeniem elementu kompozytowego.

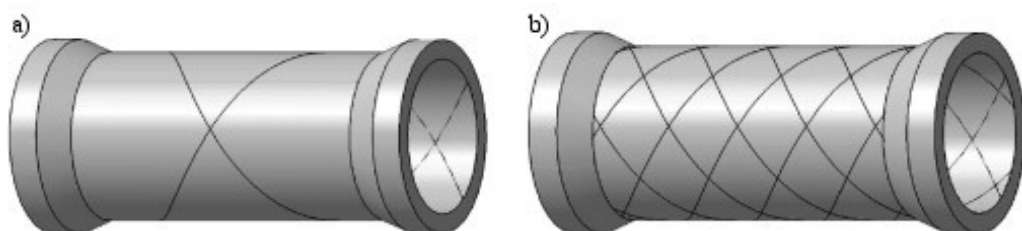
W pracach [164, 165], które są kontynuacją wcześniejszych opracowań tych autorów [136], uznano miejsca przeplecione za defekt – obszar o większej sztywności. Po takim założeniu opracowano model numeryczny dla miejsc o zwiększonej sztywności w strukturze rur cienkościennych. Autorzy wskazują na uzyskanie dobrych wyników z wykorzystaniem MES. W modelu MES rozważa się zarówno podwyższone współczynniki sprężenia spowodowane przez przeploty, jak i zwią-



Rys. 5.1. Cztery modele MES badanych wzorów mozaikowych w pracach [164, 165]

zane z tym defekty powierzchniowe. W celu weryfikacji modelu numerycznego przeprowadzono testy osiowego ściskania próbek rurowych, wykonanych według czterech odmiennych wzorów mozaikowych, różniących się liczbą i rozmieszczeniem miejsc przeplecionych na liniach przeplotów i uskoków (rys. 5.1). Stopień przeplecenia w próbkach określano przez wielkość i liczbę rombów w ścianie badanej rury. Dzięki modelowaniu MES zaobserwowano, że zdefektowanie materiału przez zwiększenie liczby rombów wpływa na zwiększenie wytrzymałości rur. Autorzy wskazują na niewielki ogólny średni błąd między wynikami obliczeń z uwzględnieniem przeplotów i danymi eksperymentalnymi, wynoszący 4,3%. Jednak badany model numeryczny nie odzwierciedla rzeczywistej sytuacji w materiale kompozytowym, a usztywnienie w przeplotach zostało dobrane tak, aby wynik obliczeń zgadzał się z eksperymentem. Według autora przedstawiony model można prędzej odnieść np. do drutu umieszczonego w ścianie rury z tworzywa sztucznego, według występujących linii przeplotów i uskoków, niż do opisywanych wzorów mozaikowych wzmocnienia. Osiągnięciem pracy jest wskazówka dla konstruktorów, aby do rur ściskanych osiowo dobierali wzory mozaikowe z większą liczbą rombów, gdyż rura podlega mniejszym skłonnościom do wybożenia. Rury z małą liczbą rombów (np. wzór mozaikowy N_r1) charakteryzują się większą tendencją do wybożenia, są mniej stabilne. Do pewnego momentu wniosek ten pokrywa się z obserwacjami autora, jednak po przekroczeniu pewnej liczby rombów w materiale zaczynają zachodzić inne mechanizmy zniszczenia i wytrzymałość rury zaczyna się zmniejszać. Dowodzą tego wyniki prac własnych autora dotyczące rur skręcanych i przedstawione w punkcie 5.3.

Interesujące badania prowadzone są w Institut Clément Ader (ICA) – Francja, we współpracy z Instituto Politécnico Nacional w Meksyku. Członkowie zespo-



Rys. 5.2. Schematycznie zaznaczone wzory: a) z jednym rombem na obwodzie rury (N_r1), b) z pięcioma rombami na obwodzie rury [122]

łu (Crouzeix, Hernandez, Perié, Douchin, Torres i in.) opublikowali kilka prac związanych z badaniami i modelowaniem wzorów mozaikowych [93, 94, 122, 191].

Praca [122] dotyczyła rur nawijanych, ale badanych ciśnieniem zewnętrznym w specjalnej komorze ciśnieniowej. Autorzy wykonali dwa porównania – pierwsze dotyczyło dwóch typów rur z małą liczbą przeplotów i z dużą liczbą przeplotów, a drugie – porównanie rur z cieńszą i grubszą ścianką (rys. 5.2). Ponadto przedstawiono analizę wytrzymałościową z wykorzystaniem klasycznej teorii laminatów, z uwzględnieniem linii przeplotów i linii uskoków (rys. 4.23). W modelu uwzględniono podział na charakterystyczne romby. We wnioskach stwierdzono, że liczba przeplotów (z tym związanych rombów) nie ma wpływu na wytrzymałość rur poddanych ciśnieniu zewnętrznemu, a jeśli tak, to pomijalny i raczej w próbkach z grubszą ścianką. W takich próbkach z wzorem N_r1 – z jednym rombem, miały one wytrzymałość o około 7% większą niż próbki z pięcioma rombami. Wykorzystując autorską metodę tablicową do określania wszystkich możliwych do wykonania wzorów mozaikowych, można udowodnić, że badane wzory nie charakteryzowały się największą liczbą przeplotów. We wzorach o największej liczbie przeplotów (N_r2) nie obserwuje się rombów, ponieważ składają się one z jednej wiązki (por. rys. 5.2 z rys. 6.1), romby wzoru N_r1 składają się z 17. wiązek, N_r8 z 8. wiązek itd., a romby wzoru N_r2 z jednej wiązki). Dlatego też autorzy mogli nie zaobserwować wyraźnych różnic pomiędzy badanymi próbkami w prowadzonych przez nich badaniach porównawczych. W badanych wzorach o dużej liczbie przeplotów były małe romby w liczbie 5 na obwodzie. Te z małą liczbą przeplotów miały 1 romb na obwodzie; jest to wzór N_r1 w metodzie tablicowej (wzory N_r1 mają zawsze 1 romb na obwodzie). A wzór z pięcioma rombami na obwodzie oznacza, że jest to piąty w szeregu ($N_p = 5$) w zależności od liczby przeplotów. Autorzy podają szerokość wiązki 4,4 mm oraz średnicę rury. Z tych danych wynika, że ewentualna dopasowana tablica ma 63 wiązki, czyli możliwych jest do wykonania około 31 różnych wzorów. Jeśli autorzy wybrali wzór z pięcioma rombami na obwodzie, to zawierał on około 1/3 maksymalnej liczby przeplotów możliwych do osiągnięcia według tablicy 63 (oszacowano na podstawie wykresu 6.2, s. 103). Może badanie wzorów tylko z początku szeregu według liczby przeplotów było powodem nie-

zauważenia przez badaczy różnic w wytrzymałości. Wtedy ewentualne różnice są zbyt małe do zarejestrowania. Praca [122] jest typowym przykładem analizowania w literaturze przedmiotu wzorów mozaikowych wykorzystanych do wzmocnień wyrobów nawijanych. Wzory są kojarzone i analizowane ze względu na występujące romby, a nie przeploty. Konsekwencją tego podejścia jest pominięcie informacji o możliwości wytworzenia wzoru o dużo większej liczbie przeplotów. Niewątpliwą wartością pracy jest zaproponowany i przeprowadzony eksperyment, w którym autorzy nie mają problemu ze związaniem dennic z rurą, ponieważ ciśnienie dociska czopy do uszczelnień. Autorzy podjęli także próbę uwzględnienia w swoich obliczeniach rombów i związanej z tym zmiany wzmocnienia podczas przejścia z jednego rombu do drugiego. Analizę wykonali z użyciem teorii laminatów, mimo że, jak sami zaznaczyli we wstępie; „struktura nawijania jest bardziej złożona niż laminat klasyczny”. Dlatego metoda analizy z użyciem klasycznej teorii laminatów jest nieodpowiednia do wyrobów nawijanych. Autorzy wspominają też, że uzyskali zadowalającą zgodność wyników obliczeń z wynikami eksperymentalnymi. Autorzy [122] przeprowadzili również analizę deformacji (wyboczenia) badanych rur w kierunku wzdłużnym i obwodowym. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych testowane wzory mozaikowe nie miały wpływu na wytrzymałość próbek rurowych.

W pracy [191] badano próbki płaskie z wzorami mozaikowymi. Celem tej pracy było uzyskanie charakterystycznego dla wzorów mozaikowych pola naprężeń podczas rozciągania próbek płaskich. W pierwszej części opisano eksperyment, druga natomiast jest porównaniem wyników eksperymentu z wynikami MES. W trzeciej części przedstawiono badania faktograficzne, w celu wyjaśnienia mechanizmów powstawania i rozwijania się uszkodzeń. Według autorów zniszczenie próbek rozpoczyna się w punktach centralnych, a następnie biegnie wzdłuż linii uskoku. W symulacji MES wyniki początku zniszczenia są podobne, ale w zniszczeniu bierze udział obwodowa linia przeplotów (w niniejszej pracy zwana linią uskoku).

W pracy [93] badano próbki rurowe z wzorami mozaikowymi według trzech sposobów obciążania – rozciąganie, skręcanie i ciśnienie zewnętrzne – w celu identyfikacji parametrów materiałowych. W badaniach, podobnie jak w poprzedniej pracy, użyto techniki pomiarowej wykorzystującej dwa zestawy kamer CCD zsynchronizowanych ze sobą do wyznaczenia przemieszczeń na powierzchni próbek rurowych. Z tego względu praca kamer jest skierowana na wydzieloną komórkę rombów wzoru mozaikowego. Porównanie wyników badań z symulacjami MES nie przyniosło oczekiwanego rezultatu zgodności wyników. Natomiast korelacje wyników z badań rur według różnych sposobów obciążania wykazują oznaki zgodności z występowaniem układów rombów. Praca jest przedstawieniem użycia obiecującej metody badawczej.

W dalszej części pracy autor przytoczył literaturę związaną z obciążeniami w postaci ciśnień wewnętrznych (gdy wiązki włókien w nawiniętym materiale

kompozytowym są rozciągane). Eksperymentalne udowodnienie, że dobór wzoru mozaikowego ma znaczenie w pracy materiału pod obciążeniem, jest bardzo trudne. Nie znaleziono w dostępnej literaturze prac zawierających wyniki badań butli kompozytowych nawiniętych według różnych wzorów mozaikowych, a jedynie wyniki badań rur. Nie znaleziono także pracy, która bada butle czy rury ciśnieniowe wytwarzane według parametrów przemysłowych, tzn. nawijanych wiązką co najmniej kilkunastomilimetrową. Nie znaleziono również pracy, która bada (generuje) pełną gamę wzorów mozaikowych. Te dwa fakty zawarte są w postawionych we wstępie tezach. Wszystkie dostępne i przytoczone dalej prace, interesujące w ujęciu postawionych tez, prezentują kilka algorytmów powstawania wzorów mozaikowych. Nie wszystkie z nich umożliwiają opis wytworzenia pełnego zestawu wzorów mozaikowych, tak jak to podaje metoda tablicowa. Jednak oryginalne metody badań i przedstawione pomysły, spostrzeżenia zostały wykorzystane w niniejszej pracy.

Jedną z najbardziej interesujących prac jest [172]. Autorzy badali rury, które miały być stosowane w rurociągach przemysłu chemicznego. Badano wpływ parametrów nawijania na właściwości wytrzymałościowe rur nawijanych. Ściślej – próbowano oszacować realny wpływ liczby przeplotów na przesiąkanie pod wpływem trzech sposobów obciążania, które scharakteryzowano również na rysunku 5.10. Autorzy badali rury bez linera. Przedstawili własną koncepcję powstawania wzorów mozaikowych. W celu wykonania próbek rurowych z różnymi wzorami mozaikowymi zbudowano nawijkę laboratoryjną sterowaną numerycznie za pomocą własnego oprogramowania. Do wytwarzania próbek rurowych o średnicy 30 mm użyto prepregu szklanego o gramaturze tex 800 (bardzo mała szerokość wiązki, ok. 3,5 mm). Kąt nawijania wynosił 55° . Dalej autorzy podali parametr wyrażający stopień przeplecenia struktury kompozytowej w procentach – jest on równy ilorazowi obszaru z miejscami przeplecionymi do obszaru, w którym zliczono przeploty. W laminatach (materiałach złożonych np. z warstw jednokierunkowych) ten współczynnik będzie równy 0 (brak przeplotów), a w tkaninie gęsto tkanej (materiał o dwóch warstwach jednokierunkowych przeplecionych wzajemnie) będzie równy 100%, ponieważ obszar z przeplotami jest równy obszarowi wziętemu do analizy. Przyjęcie takiego parametru jest bardzo wygodne, upraszcza wiele aspektów badawczych, jednak ten parametr nie uwzględnia zagadnień kluczowych – geometrii przeplotów, różnorodności wzorów, a zwłaszcza rozmieszczenia przeplotów, odległości pomiędzy nimi. Według autorów powierzchnia przeplotów zależy od zakładki nawijanych włókien; im ta zakładka większa, tym większa powierzchnia przeplotu. Zakładka powinna być parametrem stałym, który powoduje wyrównanie powierzchni wzoru mozaikowego, tak jak to przedstawiono na rysunku 4.21; s. 64. Wielkość zakładki jest ważnym parametrem w badaniach porównawczych tych samych wzorów, więc nie powinna być zmienną. Także materiały otrzymane metodą nawijania i tzw. rolowania tkanin są różne i nie mogą być przedmiotem

prostych badań porównawczych. Dalej w pracy [172] badano ciśnieniowo rury bez tzw. lineru o średnicy 30 mm. Rury wykonywano z użyciem tzw. prepregu, który powoduje dodatkowe wprowadzenie wad, przestrzeni powietrznych ułatwiających przesiąkanie. Aby ograniczyć wpływ tych wad, autorzy dodatkowo owijali próbki taśmami z tkaniny poliestrowej oraz materiału termokurczliwego, aby wycisnąć nadmiar żywicy oraz sprasować nawinięty materiał. W ten sposób faktycznie sprasowano materiał, ale także zaburzono wpływ przeplotów i naciągu. Żadna firma produkująca zbiorniki kompozytowe nie stosuje takich procedur, ponieważ powodują one osłabienie materiału. Ponadto autorzy za kryterium zniszczenia przyjęli ciśnienie przesiąkania przez powstałe uszkodzenia materiału na grubości ścianki próbki. Okazało się, że rury wykonane z tkaniny (laminatowe, czyli bez przeplotów pomiędzy warstwami tkanin) przesiąkały dużo później od rur nawijanych, co jest logiczne, ale nie ma nic wspólnego z oceną wytrzymałości na potrzeby zbiorników z linerami i materiałem kompozytowym uzyskanym metodą nawijania. Autorzy nie zauważyli znaczących różnic pomiędzy badanymi rurami nawijanymi, nie znaleziono wyraźnych różnic wybiegających poza błąd pomiaru. Odkryto, że przesiąkanie jest największe na obrzeżach miejsc nagromadzenia przeplotów. Autorzy pracy wskazują na dwie przyczyny: odejście włókien od osi w wyniku sfalowania powodującego większy rozwój pęknięć wewnątrz ścianki rur oraz zwiększoną liczbę pustek na obrzeżach miejsc sfalowanych, co podobnie ułatwia rozwój uszkodzeń. Prawdopodobnie chodzi także o warunki brzegowe przy uchwycie usztywniającym końce próbek (skokowa zmiana obciążenia zbyt blisko końców). Dlatego do takiej oceny należy wziąć pod uwagę tylko miejsca w części środkowej rury lub badać butle kompozytowe.

W pracy autora [28] również zauważono zwiększony rozwój pęknięć pomiędzy obszarami o większym przepleceniu, a zatem im większe są odległości pomiędzy obszarami przeplecionymi, tym większe pęknięcia, a ich energia nagromadzona na obrzeżach obszarów przeplecionych rośnie w miarę wzrostu obciążenia. Dalszy wzrost ciśnienia wewnątrz próbki prowadzi do złomu w obszarze występowania miejsc przeplecionych. W tych miejscach występuje koncentracja naprężeń wynikająca ze spiętrzenia uszkodzeń. Podobne wnioski mogliby wysunąć autorzy pracy [172], gdyby stosowali linery w swoich próbkach, a kryterium zniszczenia próbki byłoby ciśnienie rozerwania, a nie przesiąkania (patrz także pkt 5.3, s. 83).

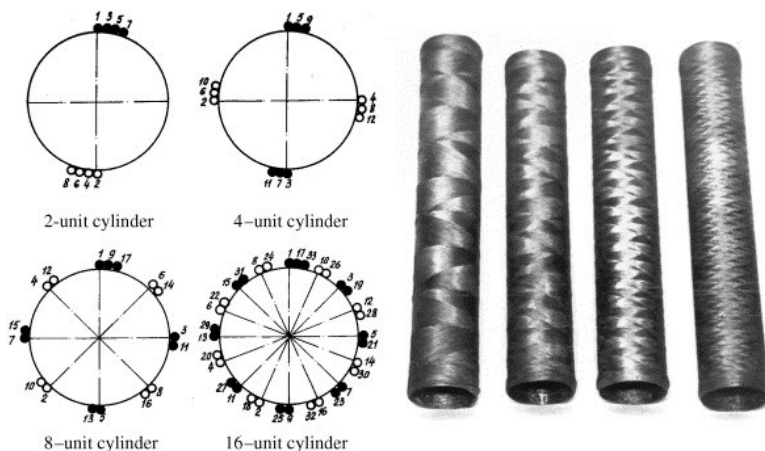
W pracy [156] prowadzono badania ciśnieniowe rur bez lineru z pomiarem cieczy wyciekającej. Ilość wycieku korelowano z wielkością zdefektowania. Jednak w tych badaniach z kolei nie uwzględniano wzorów mozaikowych. Mogłoby to być bardzo ciekawe doświadczenie ilustrujące stopień zdefektowania określony przez ilość wyciekającej cieczy pod określonym ciśnieniem.

Ciekawe obserwacje degradacji materiału kompozytowego rur nawijanych prezentowano w pracy [116]. Rury obciążano ciśnieniem wewnętrznym, zgodnie z normą ASTM [229], w układzie z zamkniętymi i połączonymi końcami (sposób III

z użyciem cieczy – rys. 5.10). Wyodrębniono trzy etapy niszczenia materiału – bielenie, przesiąkanie i zniszczenie. Opisano każdy z tych etapów, wykonano do nich dokumentację fotograficzną i wykres naprężenie–liczba cykli, niestety bez odniesienia do wzorów mozaikowych.

W pracy autora również wykonano podobne doświadczenie z użyciem gumy jako medium wywierającym ciśnienie, właśnie porównując wzory mozaikowe. Jednak autor nie zaobserwował różnic w sposobie i poziomie niszczenia próbek. Badania te przedstawiono w opublikowanych pracach [97, 200] oraz skrótowo w punkcie 5.3.

W pracy [172] przedstawiono wiele cennych sposobów badań oraz uwag i spostrzeżeń. Na przykład rozwój uszkodzenia szacowano metodą porównywania kolejnych progresywnych obciążeń – próbki obciążano stopniowo, z sukcesywnie przyrastającym naprężeniem. W czasie takiego obciążania dokonywano pomiarów odkształceń za pomocą zainstalowanych ekstensometrów. Między każdym etapem dokonywano szacowania modułów materiału, określano parametr straty sztywności osiowej, który jest miarą uszkodzenia materiału kompozytowego. Po wykonaniu wykresów naprężenie–odkształcenie nie zauważono różnic w ogólnym kształcie tych krzywych wykonanych dla różnych wzorów mozaikowych. Może to być wynikiem pewnego ujednolicenia materiału przez zastosowane prasowanie z użyciem taśm w czasie wykonywania próbek. Innym ciekawym faktem w czasie osiowego rozciągania próbek było spostrzeżenie, że inicjacja zniszczenia występuje na liniach obwodowych zgrupowania przeplotów. Obserwacje mikroskopowe świadczą o występowaniu w tych miejscach dużych pęknięć związanych z delaminacją, natomiast w dalszych obszarach poza liniami przeplotów nie zaobserwowano takich pęknięć. Zjawisko to może być spowodowane użyciem prepregu. W czasie badań rur w ramach pracy [172] z ciśnieniem wewnętrznym – naprężenia obwodowe do wzdlużnych są równe 2:1 – zaobserwowano zjawisko „bielenia się” (utraty przezroczystości) we wszystkich badanych rurach. Według autorów ten efekt pęknięcia jest bezpośrednią konsekwencją dużych naprężeń ścinających pomiędzy warstwami o przeciwnym znaku. Jednak prawidłowo dobrana i utwardzona żywica powinna zachowywać się inaczej, tzn. najwyżej powinny występować pojedyncze długie pęknięcia. Prawdopodobnie powstały jakieś błędy w przetwórstwie użytego prepregu. „Bielenie” może być także efektem „debondingu” i różnych mikropeknięć żywicy. Dalej, w badaniach próbek rurowych z połączonymi końcami, zaobserwowano ważną dla autora zależność między poziomem uszkodzenia i liczbą przeplotów. Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono większą gęstość pęknięć o 30% w próbkach z większą liczbą przeplotów w porównaniu z próbkami bez przeplotów. Dodatkowo zagęszczenie uszkodzeń było znacznie większe w przeplotach niż poza przeplotami. We wnioskach stwierdzono, że wpływ przeplotów na rozwój uszkodzeń w kompozytowym materiale nawijanym jest niewielki. Autorzy uważają, że przeploty reprezentują wewnętrzne defekty, w których mogą pojawiać się pęknięcia. Należy zminimalizować liczbę przeplotów w rurach i zbiornikach



Rys. 5.3. Schemat wytwarzania próbek według czterech wzorów mozaikowych oraz zdjęcia wykonanych próbek testowanych przez Morozova [159, 160]

nawijanych, które poddawane są obciążeniom pod ciśnieniem wewnętrznym, ale z połączonymi końcami (sposób III z użyciem cieczy; rys. 5.10). Takich konstrukcji kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych CNG i CH₂ z połączonymi dennicami jednak nie ma.

Jednymi z najlepszych prac opisujących zagadnienia wzorów mozaikowych są prace [159, 160]. Przedmiotem badań i modelowania są próbki rurowe o średnicy 60 mm, długości 140 mm oraz kącie nawijania $\alpha = 60^\circ$. W pracach zaprezentowano wyniki badań nad wpływem wzorów mozaikowych na charakterystyki mechaniczne cienkościennych cylindrów kompozytowych. Wzrost liczby elementów trójkątnych, co oznacza także zmniejszenie ich rozmiaru, powoduje, że wartości maksymalne naprężeń we włóknach maleją, zbliżając się do wartości uzyskanych z analizy konwencjonalnej i MES. Podobne efekty obserwowano w próbkach testowanych eksperymentalnie, które przedstawiono na rysunku 5.3. Po uszeregowaniu według liczby przeplotów są to wzory $N_{p2,4,8}$ i 16. W badaniach własnych autora, których wyniki zaprezentowano na rys. 6.10, s. 112, zaobserwowano podobne efekty. W pracach [159, 160] jednoznacznie stwierdzono, że mechanika cienkościennych rur kompozytowych jest wrażliwa na wzory nawijania, a rozkłady odkształceń i naprężeń są zależne od wielkości trójkątnych jednostek, wzorów mozaikowych oraz ich liczby na długości i obwodzie cylindra. Według Morozova wzór mozaikowy N_{r1} generuje największe wartości naprężeń wzdłuż włókien oraz z tym związane największe powierzchniowe niejednorodności. Na podstawie badań własnych autora sformułowano podobne wnioski, ale dodatkowo autor niniejszej pracy zaobserwował, że materiał wykonany według wzoru N_{r1} ma jeszcze jedną ważną właściwość, a mianowicie największą zdolność do zatrzymywania powstałych w obszarach bez przeplotów długich pęknięć. W konsekwencji tego zatrzymania

następuje również ujednolicenie lokalnych różnic w naprężeniach pomiędzy wiązkami w czasie obciążania. W pracach [159, 160] jasno przedstawiono zagadnienie występowania różnych wzorów mozaikowych oraz opis użytych modeli. Autorzy nie rozpatrują skrajnych wzorów, czyli N_r1 i N_r2 . Prawdopodobnie opisywany model nie uwzględnia skrajnych wzorów o dużej liczbie przeplotów (np. wzorów N_r2). Morozov na podstawie wyników modelowania wskazuje także zanikanie efektu wpływu mozaik w powłokach wielowarstwowych. Podkreśla możliwości wykonywania różnych warstw w czasie nawijania, w celu zminimalizowania wpływu efektu mozaik na lokalne różnice w naprężeniach. Chodzi o przesunięcie nakładanych na siebie kolejnych takich samych wzorów. Takie pomysły były sugerowane także w pracy autora, np. [28]. Szkoda, że w pracach Morozova, nie podano z jakiej liczby wiązek składały się sekcje trójkątne mozaiki, ponieważ z rysunku 5.3 to nie wynika. Pozwoliłoby to odpowiedzieć na pytanie, czy większa liczba wiązek ma wpływ na efekt mozaikowy. Jak przedstawiono w niniejszej pracy w punkcie 6 wyniki badań i wnioski są inne niż w pracy Morozova.

Obiecująco w ostatnich latach rozwijają się metody nieniszczące, które wykorzystują obciążenie termiczne w celu uaktywnienia wad materiałowych w kompozytach. Tradycyjne nieniszczące techniki badawcze umożliwiają wykrycie mikrodefektów większych niż 60–100 μm , podczas gdy nieszczelności są zwykle inicjowane przez mikrodefekty – mikropęknięcia, mikropory itp., o rozmiarach poniżej 60–100 μm . Dlatego nowe techniki szczególnie przydatne są w badaniach zbiorników kompozytowych jako obiektów niebezpiecznych w czasie testów ciśnieniowych. W pracy [88] zaprezentowano technikę diagnostyki termicznej, polegającej na krótkotrwałym nagrzaniu lampami dużej mocy powierzchni zbiornika w celu wykrycia wad podpowierzchniowych. Również podczas obciążania zbiornika, np. ciepłym olejem, odbywa się penetracja rozszerzających się mikroszczelin z jednoczesnym ogrzewaniem materiału ścianki. W ten sposób powstają lokalne powierzchnie o anormalnej temperaturze – specyficzna cecha powierzchni zawierającej mikrodefekt. Powierzchnie badane po odpowiedniej obróbce cyfrowej pokazywane są jako termogram. Do analizy obrazu autorzy wykorzystują autorskie metody modelowania z wykorzystaniem MES. Za pomocą opisanej metody wskazuje się wady w materiale kompozytowym zbiorników. Jednak nie są to wady związane z liczbą i rozmieszczeniem przeplotów.

W niniejszej pracy sprawdzono metodę szerografii, a wyniki badań przedstawiono w podpunkcie 6.9 oraz pracy z udziałem autora [82]. Szerografia jest interferencyjną metodą badawczą, dzięki której można rozpoznawać uszkodzenia lub wady wewnętrzne elementów poddanych obciążeniu. Ułatwia ona wykrycie deformacji w obszarach o szerokości zaledwie kilku mikrometrów. Jednak nie udało się tą metodą zaobserwować efektu wady, jaką są przeploty zgrupowane na liniach przeplotów i uskoków. Zaobserwowano natomiast niewielkie wady materiałowe

w postaci większego udziału pustek powietrznych w przeplotach oraz zwiększonych udziałów żywicy i pęcherzy powietrza pomiędzy nieprzeplecionymi wiązkami.

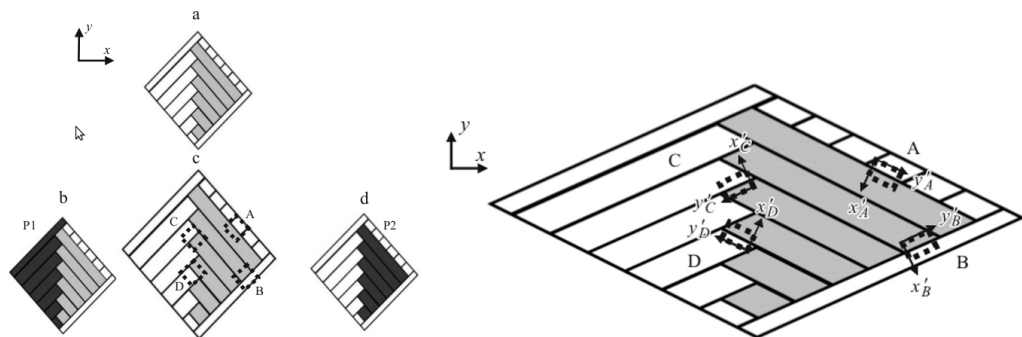
5.2. Przykłady modelowania wzmocnień według wzorów mozaikowych

Elementy kompozytowe wykonywane techniką nawijania są w pewnym sensie łatwiejsze do obliczeń wytrzymałościowych, ponieważ z góry wiadomo, jaki jest udział włókna w materiale (ile wiązek rowingu nawinięto) oraz jak jest ono ułożone. Włókna są też ułożone z określonym naciągami bez tzw. sfalowań są ciągłe, a próbki są bardziej powtarzalne w porównaniu z np. laminowanymi ręcznie. Takie podejście do materiału przedstawiono w [132] oraz wykorzystano w modelowaniu butli próbnych przedstawionych w dalszej części pracy.

W literaturze przedmiotu znaleziono kilka prac dotyczących modelowania elementów wytwarzanych metodą nawijania. Najbardziej interesujące z tych prac, przedstawione w poprzednim podrozdziale to prace Morozova [159, 160]. Scharakteryzowano w nich modele obliczeniowe. Przeanalizowano trzy sposoby modelowania struktur nawijanych z wzorami mozaikowymi. Praca ta jest punktem wyjścia dla wielu badaczy cytowanych w dalszej części. W zależności od specyficznych cech wytwarzania rur metodą nawijania pod kątem $\pm\alpha$, otrzymana struktura ze wzorem mozaikowym może być bardziej skomplikowana niż struktura powszechnie adaptowana jako model kątowy do analizy naprężeń laminatowych struktur kompozytowych. Pierwszy sposób modelowania przyjmuje, że struktura laminatowa złożona jest z warstw ortotropowych $+\alpha_i$ i $-\alpha_i$, gdzie i jest numerem warstwy. Drugi jest oparty na homogennej warstwie ortotropowej $\pm\alpha$. Oba wymienione podejścia do modelowania są powszechnie akceptowane i wykorzystywane przez istniejące oprogramowania do modelowania MES kompozytowych struktur laminatowych. Trzeci to rzeczywista struktura z wzorami mozaikowymi złożona jest z dwóch warstw o orientacji włókien $+\alpha$ i $-\alpha$, ale warstwy te są wzajemnie przeplecione. W efekcie nawijana struktura kompozytowa jest scharakteryzowana przez osobliwy regularny wzór mozaikowy złożony z trójkątnych powtarzających się elementów, z naprzemiennie ułożonym wzmocnieniem pod kątem $\pm\alpha$ i $\mp\alpha$. Stosując to podejście, przeprowadzono analizę naprężeń dla struktur z trzema różnymi wzorami mozaikowymi. Uzyskane wyniki porównano z otrzymanymi według dwóch pierwszych koncepcji modelowania – homogennej ortotropowej warstwy kątowej modelowanej według konwencjonalnej analizy MES oraz z rozwiązaniem analitycznym zbudowanym na membranowej teorii powłok. Wyniki obliczeń metodą analityczną i MES dają podobne wartości naprężeń. W cylindrach uwzględniających wzory mozaikowe wartości naprężeń są różne zarówno w kierunku osiowym, jak i obwodowym, a przewidywane wartości naprężeń maksymalnych wzdłuż włókien, lokalnie na powierzchni rury, są nawet dwukrotnie wyższe. Wzrost

liczby elementów trójkątnych, co oznacza także zmniejszenie ich rozmiaru, powoduje, że wartości maksymalne naprężeń we włóknach maleją, zbliżając się do wartości uzyskanych z analizy standardowej i MES. Podobne efekty obserwowano w próbkach testowanych eksperymentalnie, które przedstawiono na rysunku 5.3.

W pracy [157] badano wpływ wzorów mozaikowych na pole naprężeń i odkształceń w cienkościennych rurach i zbiornikach ciśnieniowych obciążanych ciśnieniem wewnętrznym. Praca jest próbą rozszerzenia prac Morozova. Przeprowadzono analizę strukturalną, stosując MES z użyciem oprogramowania komercyjnego Ansys. Autorzy [157] wskazują na niekorzystne aspekty użycia do analizy naprężeń standardowego oprogramowania MES, które zwykle zaniedbuje wpływ wzorów mozaikowych. W pracy porównano wyniki rozwiązania analitycznego i konwencjonalnej analizy MES, które dostarczyły porównywalne wartości naprężeń w pojedynczych warstwach. W modelu wyodrębniono trójkątne jednostki różniące się naprzemiennie kątem ułożenia wzmocnienia $+\alpha$ i $-\alpha$. Liczba wiązek w tak modelowanych obszarach trójkątnych nie miała znaczenia, dlatego można się domyślać, że autorzy nie określili komórki rombowej za pomocą szerokości i liczby wiązek, czyli w oderwaniu od wzorów mozaikowych. Rozkłady naprężeń otrzymane przez wprowadzenie efektu mozaikowego są zróżnicowane. Maksymalne naprężenia działające wzdłuż kierunku włókna są większe niż obliczone z zastosowaniem standardowej MES. Osiągnięciem pracy też jest zamodelowanie i analiza naprężeń kompletnego zbiornika z dennicami, z uwzględnieniem wzorów mozaikowych także na dennicach, ale w zastosowaniach przemysłowych nie wykonuje się takich zbiorników, tzn. nawijanych jedną wiązką rowingu i to o bardzo małej gramaturze oraz króćców wyjściowych o dużej średnicy zewnętrznej (tzw. basach). Autorzy porównywali otrzymane wyniki z modelowania z wynikami eksperymentalnymi innych autorów (Morozow, Vasiliev, Vorobry), sami nie przeprowadzali badań eksperymentalnych. W szczególności zamodelowano próbki rurowe z dwiema, czterema, ośmioma i szesnastoma, jak piszą autorzy [157], jednostkami trójkątnymi, czyli prawdopodobnie były to uszeregowane zgodnie z liczbą przeplotów kolejne wzory mozaikowe z jednej tablicy, czterech pierwszych wzorów mozaikowych. Z przedstawionych danych nie można wyznaczyć, nawet w przybliżeniu, numeru tablicy. Natomiast na podstawie przedstawionych rysunków nie można dopatrzeć się różnych wzorów mozaikowych, ze względu na zmianę współczynnika reszty skoku nawijania a . Modelowane rury przedstawione na rysunku sprawiają wrażenia nawijanych według tego samego wzoru, jednak z różnymi kątami nawijania. Podobnie były modelowane zbiorniki zawierające 12, 20 i 28 jednostek trójkątnych na obwodzie. Oznacza to nawijanie bardzo wąską wiązką rowingową. Jak wspomniano wcześniej, takich zbiorników nie wytwarza się technologiami przemysłowymi. Wyniki modelowania rur i zbiornika ciśnieniowego wykazują podobne trendy. Rozkład naprężeń lokalnie wykazuje duże gradienty na powierzchni elementu zarówno na obwodzie, jak i wzdłuż tworzącej. Ze wzrostem liczby jednostek



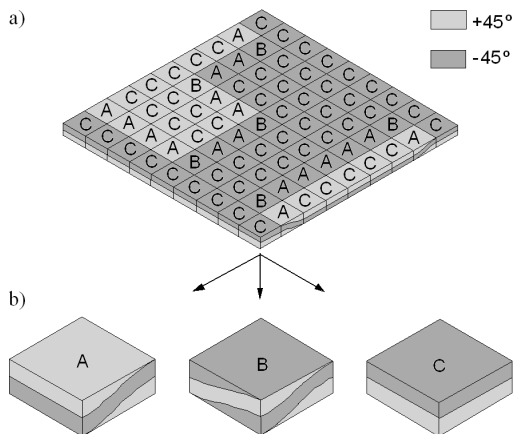
Rys. 5.4. Po lewej podział komórki elementarnej (a) na mniejsze komórki: powierzchnia P1 (b), regiony sfalowania A, B, C i D (c), powierzchnia P2 (d). Po prawej zdefiniowany system skoordynowania lokalnych komórek [205]

trójkątnych (wzrost liczby przepływów) obniża się wartość naprężeń działających wzdłuż włókien. Jednak ten wniosek nie mówi o wytrzymałości końcowej ani o powstawaniu i rozwijaniu się uszkodzeń w kompozytowym materiale nawijanym. Praca [157] jest bardzo podobna do prac Morozova.

Autorzy [205] zaprezentowali nieliniowy model uwzględniający tzw. sfalowanie (ang. *undulation*) w strukturach elementów nawijanych. Według autorów, aby zamodelować stan elastyczny w strukturach nawijanych, należy także uwzględnić cechy mozaikowe warstwy krzyżowej, związane ze sfalowaniem. Autorzy wiążą strukturę nawijaną części walcowej z rombowa komórką (charakterystyczną w warstwach krzyżowych) oraz ze znajdującymi się w niej podkomórkami (rys. 5.4). Przeprowadzone w pracy symulacje numeryczne wykazują wpływ parametrów nawijania na sztywność nawijanych rur kompozytowych związaną z modułem osiowym. Opracowanie zawiera bogaty przegląd literatury z powołaniami na osiągnięcia innych badaczy, między innymi na [136, 164, 165, 203]. W tych pracach wskazuje się na wpływ sfalowań i skrzyżowań na właściwości mechaniczne kompozytowych elementów rurowych. Chodzi też o zwrócenie uwagi na właściwości krzyżowych wzorów mozaikowych, tzn. uwzględnienie sfalowania w dwóch kierunkach; na długości części walcowej wiązki przeplatane są naprzemiennie (raz wchodzą pod spód, a następnie wychodzą na wierzch), czyli nie tylko w jedną stronę. Autorzy przeprowadzili ocenę przydatności zaproponowanego modelu do przewidywania modułu osiowego w nawijanych próbkach rurowych, z porównaniem przewidywanego modułu z danymi eksperymentalnymi. Przedyskutowali wpływ różnych parametrów wytwarzania na przewidywany wynik modelowania. Omówiono także i porównano wyniki symulacji z klasyczną teorią laminatów (wpływ nieliniowości materiału i wyraźnej geometrii związanej nierozłącznie z procesem wytwarzania – chodzi o wiązki sfalowane – na moduł osiowy ściskanej i rozciąganej próbki rurowej). Autorzy dokonali walidacji swojego modelu na przykładzie rur rozciąg-

ganych, ściskanych i zginanych. Próbki rurowe wykonano z włókna węglowego oraz elastycznej żywicy epoksydowej. Z tych rur wycinano próbki do badań w celu określania danych materiałowych. W sumie wytworzono dwa typy rur 30° i 45° , o grubości ścianki 1,8 mm, grubości wiązki 0,3 mm, szerokości wiązki 2,38 mm i średnicy rur 51,4 mm. W symulacjach przyjęto stosunek szerokości wiązki do wysokości jako 8, podczas gdy autorzy – [136, 164, 165] podają 6–10 (w warunkach przemysłowych stosunek ten jest około trzykrotnie wyższy). Wymienione próbki rurowe były wykonane z kolei w dwóch wariantach – 8- i 4-romboidalne wzory na obwodzie (wzór mozaikowy 8 i 4 w szeregu według liczby przeplotów (rys. 4.14, s. 53). Do badań użyto ekstensometrów o bazie pomiarowej 25 mm. Porównując wyniki badań rur o kącie 45° z rezultatami symulacji, autorzy stwierdzili, że model niedostatecznie uwzględnia mikrowyboczenia włókien. Lokalnie zachodzące mikrowyboczenie włókien nie jest wychwycone przez model. Osiągnięciem pracy jest uwzględnienie ważnych parametrów nawijania, takich jak kąt nawijania i okrążania (do wyznaczenia parametrów wzorów rombów) w celu badania modułu osiowego. W wyniku symulacji stwierdzono, że rury z podziałem czterorombowym mają większe moduły aniżeli podobne rury z podziałem ośmiorombowym, przy tym samym poziomie odkształcenia. Wytlumaczenie tego wyniku jest związane z większą frakcją powierzchni sfalowanej dla podziału ośmiorombowego aniżeli rury z podziałem czterorombowym. Wpływ wzorów mozaikowych z większą liczbą przeplotów na wytrzymałość elementów rurowych ściskanych i rozciąganych jest większy od wzorów z mniejszą liczbą przeplotów. W zaproponowanym modelu można zauważyć, że parametry wytwarzania wpływają na moduł osiowy rur nawijanych. Według autorów, powinno się uwzględniać sfalowanie (np. w postaci zaproponowanego przez autorów modelu) w symulacjach dotyczących wyznaczania lokalnych odkształceń i naprężeń elementów rurowych. We wnioskach autorzy przyznają, że eksperyment należy dopracować i powtórzyć. Wszystkie podane w artykule wnioski, dotyczące wpływu sfalowań (czyli przeplotów) na wytrzymałość rur (moduł osiowy), autorzy opierają na wynikach symulacji komputerowych. Przedstawione wyniki prac badawczych są bardzo ubogie. Nie wiadomo jaka była liczność próbek oraz sposoby ich mocowania, kryteria i jak wyglądały zniszczenia.

W pracy [204] autorzy przedstawili przykład modelowania kolejnych warstw zbiornika kompozytowego, zaczynając od linera, który jest pierwszą warstwą. Zbudowano dwa modele – pierwszy był cylindrem obciążonym ciśnieniem wewnętrznym w kierunku obwodowym, drugi obciążonym w kierunku osiowym. W tym modelu całkowite naprężenie osiowe jest rozdzielone na wszystkie cylindry, wszystkie warstwy, na które działa ciśnienie wewnętrzne. Podano też grupę równań łączących warunki graniczny ciągłego przemieszczenia między warstwami. Z rozwiązania tych równań otrzymano ciśnienia wewnętrzne dla każdej warstwy w kierunku osiowym i obwodowym. Uzyskano rozkład naprężeń na cylindrze z ciśnienia wewnętrznego dla każdej warstwy. Po obliczeniu naprężeń w warstwach



Rys. 5.5. Model 3D powtarzalnej podstawowej komórki rur wytwarzanych metodą nawijania (a) oraz trzy podstawowe bloki składowe (b), [203]

można dokonać optymalizacji projektu zbiornika przez dopasowanie kąta nawijania i grubości warstwy w całej strukturze kompozytowej. Według autorów [204], można wykonać racjonalny projekt zbiornika kompozytowego.

W pracy [203] przedstawiono bardzo szczegółowy przegląd funkcjonujących modeli obliczeniowych oraz podkreślono, że do tej pory nie ma żadnych numerycznych i analitycznych rozważań popartych badaniami, w których rzeczywiście skrzyżowania włókien, sfalowania, nakładki są obecne w trójwymiarowej strukturze nawijanej; chodzi o analizę powtarzalnej jednostkowej komórki we wzorze mozaikowym.

Przedstawiono dwuskalową analizę numeryczną do symulowania efektywnych właściwości powierzchni cylindrycznych rur nawijanych z zastosowaniem metody homogenizacji (por. pkt 6.10, s. 126). Określono model powtarzalnej podstawowej komórki (*repeated unit cell* – RUC) w mikro- i mezoskali dla rury nawijanej zgodnie z procesem technologicznym, w którym opisano skrzyżowania (*cross-overs*), sfalowania (*undulations*) i nakładanie się wiązek – nakładki (*overlaps*) z zastosowaniem techniki modelowania *bottom-up solid* (rys. 5.5). Pokazano, że można skonstruować z trzech bloków podstawowych złożoną RUC zawierającą skrzyżowania, sfalowania i nakładania się. Zaprezentowano również podejście w celu implementowania ogólnych, okresowych warunków brzegowych, zgodnie z MES. W praktyce zaprezentowano użycie stałych sprężystości rur epoksydowo-szklanych w modelowaniu liczby wiązek nawijanych i ich kształtu. Otrzymano rozkład naprężenie–odkształcenie w powtarzalnej komórce, który informuje o lokalnych koncentracjach naprężeń–odkształceń spowodowanych skrzyżowaniami, sfalowaniami i przeplotami wiązek włókna. Te informacje wskazują na prawdopodobne miejsce zniszczenia rury. Wyniki symulacji porównywano z wynikami uzyskanymi przez

innych autorów, z zastosowaniem innych metod MES i analitycznych związanych z klasyczną teorią laminatów. W wyniku porównań znaleziono wiele rozbieżności. Autorzy nie dokonali weryfikacji eksperymentalnej uzyskanego wyniku, a jedynie porównali swoje wyniki z modelowania z wynikami prac eksperymentalnych innych autorów. Praca zawiera bardzo cenny materiał dotyczący modelowania wzorów mozaikowych.

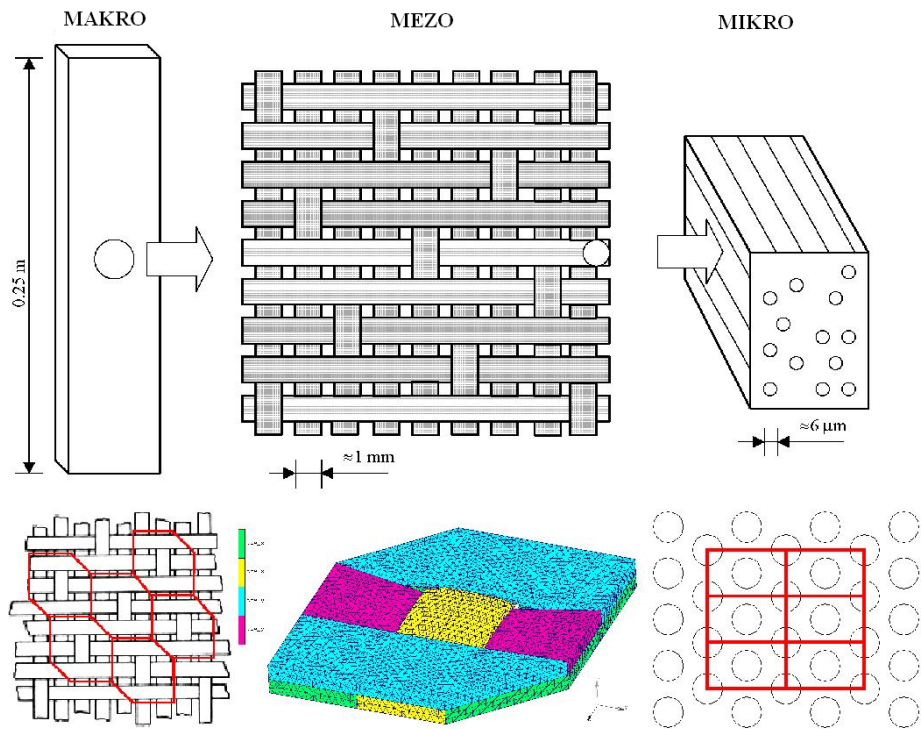
W pracy [146] modelowano i sprawdzano eksperymentalnie różne układy włókien zarówno w tkaninach, jak i we wzorach mozaikowych. Sprawdzano przydatność modeli o różnych układach wzmocnienia. Przedstawione symulacje zawierają głównie modele badaczy niemieckich oraz są poparte licznymi badaniami eksperymentalnymi, np. podrozdział 6.1 zawiera wyniki badań sprawdzających modele dla rur nawijanych, przy rozciąganiu, ściskaniu i skręcaniu. Przedstawione przypadki zniszczeń nawijanych rur kompozytowych są zbieżne z mechanizmami opisanymi w niniejszej pracy. Autor brał udział w przygotowywaniu materiału badawczego na potrzeby cytowanej pracy, co udokumentowano w pracach [31, 124].

W pracach [13, 173] badano wpływ przeplotów na rozwój uszkodzeń w laminatach z tkanin, z wykorzystaniem oryginalnych metod badawczych. Do żywicy dodawano pył aluminiowy, a następnie z użyciem metod rentgenowskich dokonywano oceny wpływu przeplotów na zachowanie się laminatu pod obciążeniem. Układy przeplotów występujących w tkaninie, w tym wypadku o splocie ośmiokrotnym, tzw. satynowym, dzielono na komórki, które modelowano z wykorzystaniem MES, a następnie metody homogenizacji (por. pkt 6.10). Na rys. 5.6 przedstawiono komórkę laminatu tkaninowego wykorzystywaną przez autorów w metodzie homogenizacji. Jak wspomniano, prace [13, 173] dotyczą modelowania przeplotów w tkaninach, ale ze względu na podobny charakter przeplotów tkaninowych można te modele adaptować do przeplotów występujących we wzorach mozaikowych.

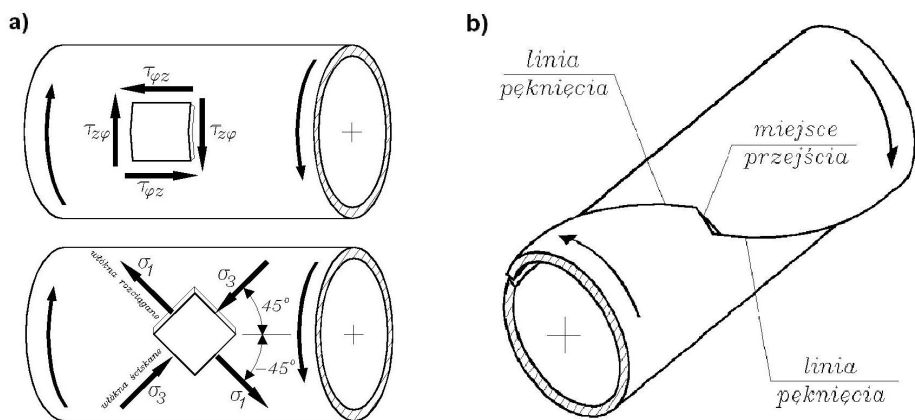
5.3. Badania własne wzorów mozaikowych

W dalszej części zawarto skrótowe przedstawienia wyników badań własnych autora, które dotyczyły wzorów mozaikowych. Są to głównie wybrane wyniki badań przeprowadzonych w ramach pracy [28], ale dotyczą one też postawionych w niniejszej pracy.

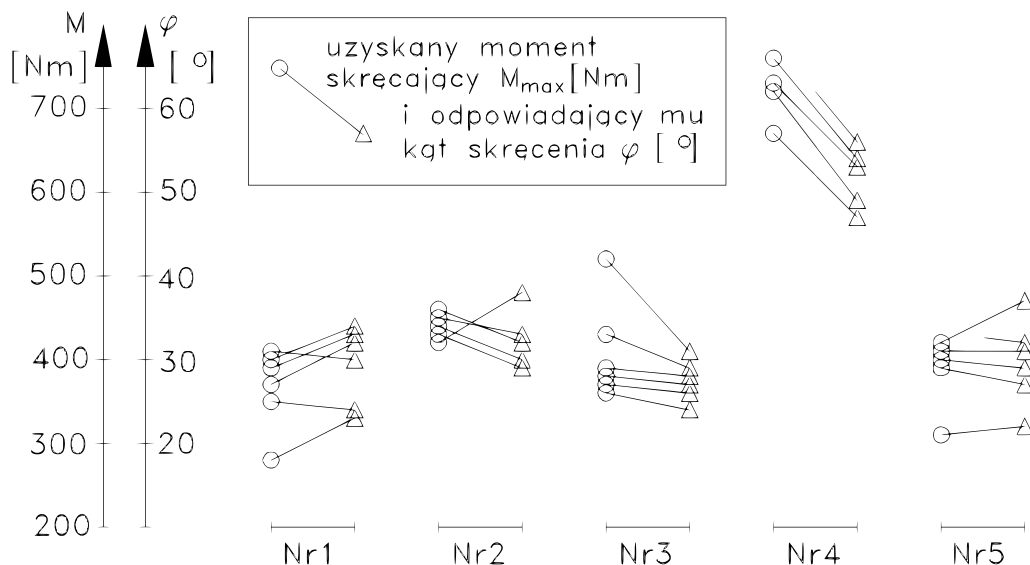
W pracach autora [28, 32] zaprezentowano badania rur kompozytowych z wzorami mozaikowymi na skręcanie. Stan naprężeń w ścianie jest bardzo korzystny, ze względu na możliwość zarejestrowania różnic w wytrzymałości badanych wzorów mozaikowych (rys. 5.7). Chodzi o to, że włókna nawinięte pod kątem $\pm\alpha = 45^\circ$ są w kierunku $+\alpha$ rozciągane, a w kierunku $-\alpha$ ściskane lub odwrotnie. Naprężenia ściskające nawiniętych wiązek są decydujące, ponieważ przeploty są punktami podparcia. Do projektowania, analizy nawijania i doboru wzorów mozaikowych dla skręcanej próbki rurowej posłużono się metodą tablicową. Wybrano i badano



Rys. 5.6. Komórka laminatu tkaninowego wykorzystywana przez autorów [13, 173] w metodzie homogenizacji



Rys. 5.7. a) płaski stan naprężeń oraz stan naprężeń w kierunkach głównych elementu rury skręcanej, b) szkic próbki po zniszczeniu



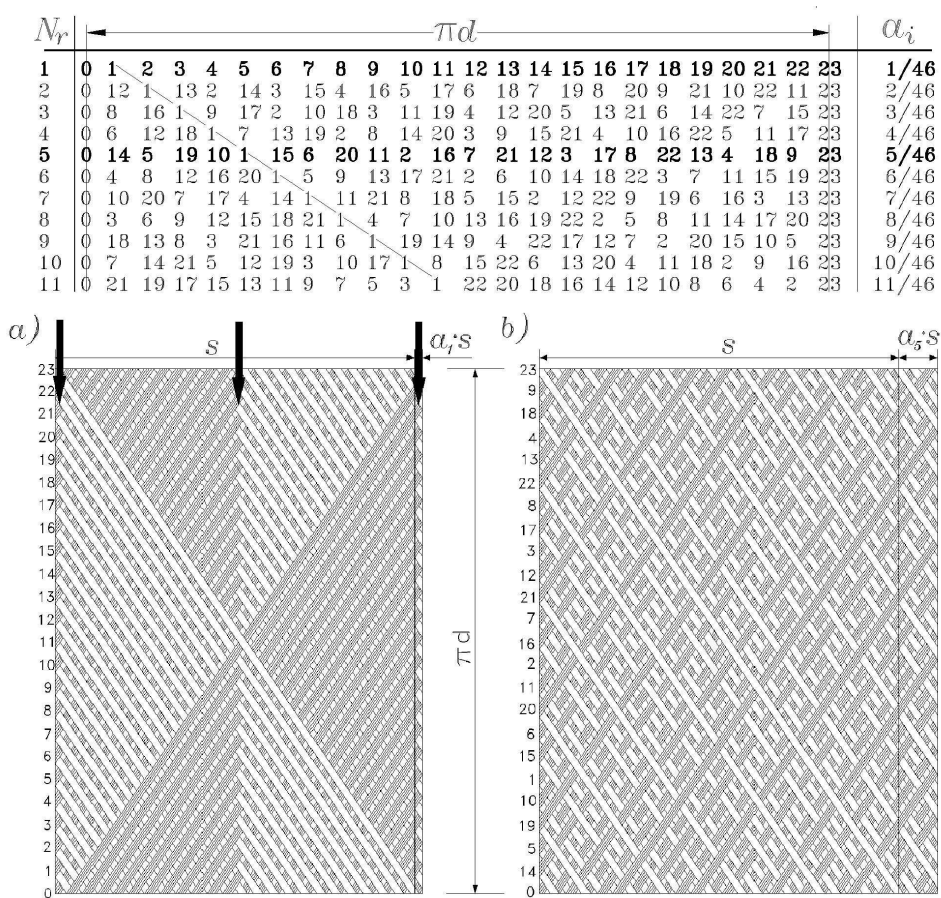
Rys. 5.8. Wyniki badań momentu skręcającego i kąta skręcenia przedstawione w sposób graficzny

wzory wykonane na próbkach z tablicy 11 (rys. 4.8), przedstawione na rysunku 4.11. Obserwacje prowadzone dla pięciu różnych rodzajów wzorów w rurach kompozytowych wykonanych metodą nawijania umożliwiają stwierdzenie, że liczba i rozmieszczenie przeplotów (a także z tym związana średnia długość wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ – długość wiązki pomiędzy przeplotami) mają wpływ na wytrzymałość próbki. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 5.8. Rury z wzorami N_r4 charakteryzują się największą wytrzymałością na skręcanie oraz największymi kątami skręcenia. Kierunek włókien ściskanych w ściance ulega załamaniu, tworząc uskok pokazany na rysunku 5.7b. Taki mikromechanizm zniszczenia kompozytu nazywany jest *kinkingiem* [187]. Początek *kinkingu* występuje w pobliżu powierzchni rury, gdzie włókna nie są podparte z jednej strony. Wyboczona warstwa oddziałuje na sąsiednią, co powoduje rozwarstwienie w okolicy pęknięcia. Szczegóły badań rur skręcanych zawarto także w pracach z udziałem autora [18, 19, 36, 90, 91].

Inną grupą badań autora były testy ciśnieniowe próbek rurowych. Na podstawie tablicy 23 wykonano dwa rodzaje próbek rurowych: N_r1 i N_r5 (rys. 5.9). Dla rur N_r1 i N_r5 liczba przeplotów wynosi 176 i 1008. Wzór N_r5 jest dziewiąty w szeregu według liczby przeplotów – $Np_5 = 9$.

Podobnie jak w opracowaniach [111, 112, 117], rury badano według sposobu II i III (rys. 5.10; por. także pkt 5.3):

SPOSÓB II – rysunek 5.11a rury o długościach około 30 cm zaślepiano z obu końców specjalnie przygotowanymi czopami stalowymi, które nie były połączone ze sobą, przez jeden z czopów wtłaczano olej, aż do zniszczenia próbki. W tym



Rys. 5.9. Tablica wzorów mozaikowych oraz rozwinięcia wzorów:

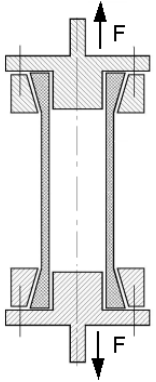
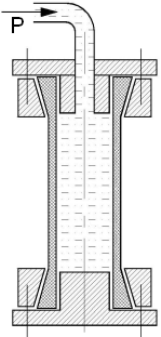
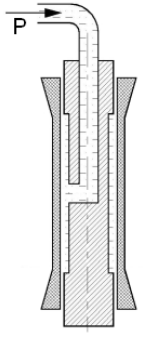
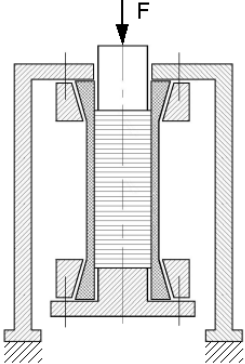
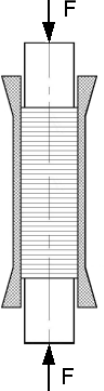
a) N_r1 , b) N_r5 , wykonanych rur

przypadku zniszczenie, to pojawienie się pęknięć wzdłużnych, przez które następuje wyciek oleju większy niż wydatek pompy.

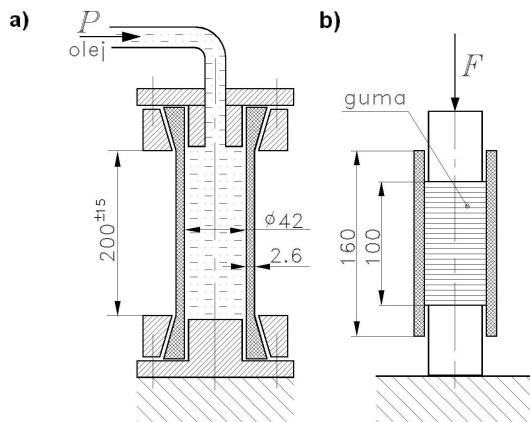
SPOSÓB III – rysunek 5.11b do rur o długościach 16 cm wkładano dopasowany stos krążków z gumy wysokości 10 cm. Następnie z obu końców wkładano stalowe tłoki i całość ścisano osiowo na zrywarce do momentu zniszczenia próbki (rys. 5.12).

Na rysunku 5.12 przedstawiono widok w chwili zniszczenia rur N_r1 i N_r5 obciążanych według SPOSOBU III.

Przeprowadzone badania ciśnieniowe nie umożliwiają jednoznacznego stwierdzenia, że liczba i rozmieszczenie przeplotów mają wpływ na wytrzymałość rury ciśnieniowej. Wyniki badań ciśnieniowych według SPOSOBU II, przedstawione w [20, 26, 28], wskazują, że wzór N_r5 ma nieznacznie większą wytrzymałość od

	Sposób I	Sposób II	Sposób III
Rozkład naprężeń	σ_w $\sigma_w = \sigma_{\max}$ $\sigma_o = 0$ $-\sigma_w$	σ_w $-\sigma_o$ σ_o $-\sigma_w$ $\sigma_w = 2 \sigma_o$	$-\sigma_o$ σ_o $\sigma_o = \sigma_{\max}$ $\sigma_w = 0$
Uchwytowe w szczękach maszyny wytrzymałościowej			
Z użyciem cieczy			
Z użyciem elastomeru			

Rys. 5.10. Schematy sposobów obciążania próbek rurowych



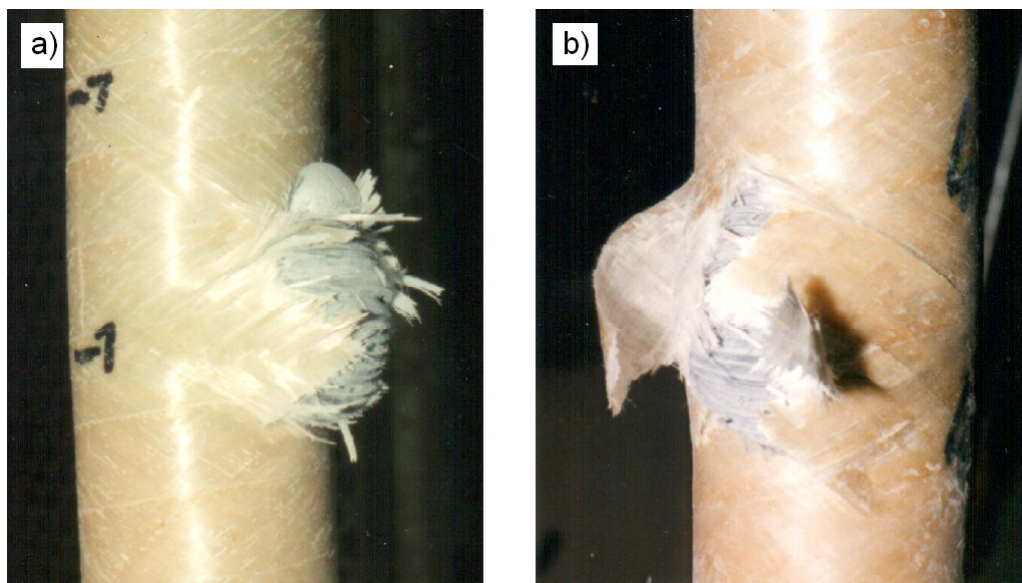
Rys. 5.11. Schematy dwóch sposobów obciążania próbek rurowych:
 a) dwuosiowy stan obciążenia realizowany olejem według SPOSOBU II,
 b) jednoosiowy stan obciążenia realizowany gumą według SPOSOBU III

wzoru N_r1 , jednak uwzględniając odchylenie standardowe otrzymanych rezultatów wynikające z niejednorodności materiału, niepewność pomiaru oraz małą licznosc próbek, otrzymany wynik może budzić wątpliwości. Dodatkowy argument to kryterium zniszczenia, a mianowicie wyciek oleju przez mikropęknięcia, który w próbkach N_r1 jest większy.

Wyciek ten jest związany z innym charakterem powstałych pęknięć w materiale. We wzorach N_r1 pęknięcia w obszarze bez przepłotów są większe, natomiast we wzorach N_r5 są mniejsze i mają charakter płaski, tak jak przy rozwarstwieniach. Przypuszczano, że podane rozważania uda się rozstrzygnąć badaniami ciśnieniowymi z użyciem gumy jako medium roboczego według SPOSOBU III, jednak wyniki ich są podobne. Jedynie na podstawie wyglądu zniszczonych „gumą” próbek według SPOSOBU III można dopatrzeć się różnic jakościowych w pęknięciach:

- Rury z wzorem N_r1 pękają punktowo na linii obwodowej krzyżowania się wiązek (rys. 5.9 i 5.12).
- Rury z wzorem N_r5 pękają na większej powierzchni. Końcowej fazie pęknięcia próbek N_r5 dodatkowo towarzyszy odwarstwienie i oddzielone wierzchniej warstwy rury kompozytowej.

Rury te badano także ciśnieniowo z pomiarem przemieszczeń metodą interferometrii holograficznej, co przedstawiono w [26, 28]. Celem przeprowadzonych badań jest analiza wpływu wzoru mozaikowego nawiniętych wiązek na obraz przemieszczeń ścianki rury. Widoki wzorów mozaikowych N_r1 i N_r5 przedstawiono na rysunku 5.9. Próbkki badane metodą interferometrii holograficznej charakteryzowały się jedynie cieńszą ścianką w porównaniu z rurami przedstawionymi wcześniej (liczba warstw = 4). Na rysunku 5.13b przedstawiono przykładowe interferogramy zarejestrowane dla obu badanych rur techniką podwójnej ekspozycji. Przedsta-

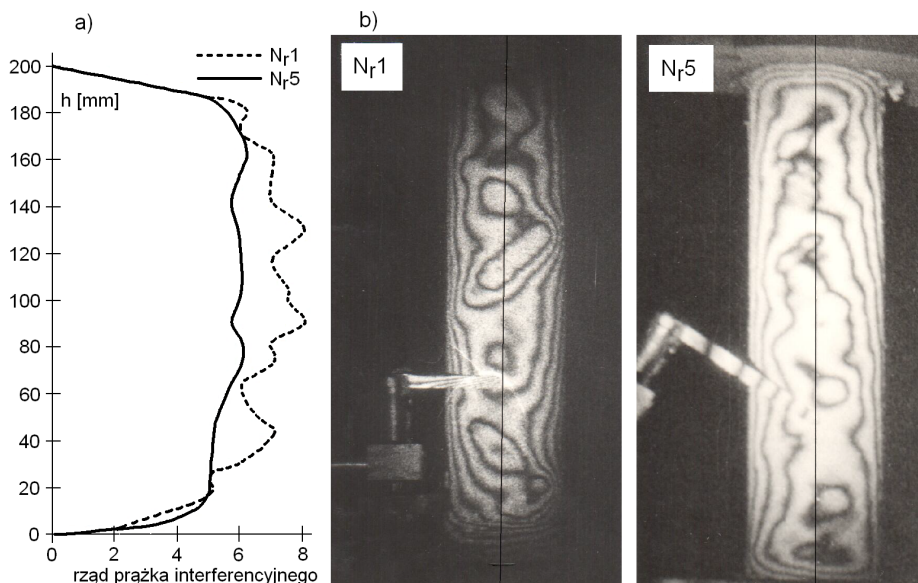


Rys. 5.12. Widok próbek rurowych z wzorami:
a) N_r1 , b) N_r5 , obciążanych według SPOSOBU III w chwili zniszczenia

wiony rozkład prążków uzyskano w przypadku, gdy ciśnienie wstępne wynosiło $P = 150$ barów, a przyrost ciśnienia $\Delta P = 1$ bar. Na podstawie zarejestrowanych interferogramów wykonano wykresy przemieszczeń w kierunku normalnym do powierzchni badanych rur. Przykładowe wykresy przemieszczeń przedstawiono na rysunku 5.13a.

Analizując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że struktura przemieszczenia punktów leżących na tworzącej rury N_r5 jest bardziej równomierna niż w przypadku rury N_r1 . Również wartości przemieszczeń ścianki rury N_r5 są niższe o około 20%. Dla obrazu przemieszczeń zarejestrowanego w przypadku rury N_r1 charakterystyczne jest to, że w środkowej części odcinka pomiarowego (ok. $2/3$ długości badanych rur) mniejsze wartości przemieszczeń występują w miejscach, gdzie następuje zgrupowanie przepłotów (zaznaczone strzałkami na rys. 5.9a). Przemieszczenia te zmieniają się wzdłuż osi rury, a różnice ich wartości wynoszą nawet 25%. Można na tej podstawie twierdzić, że również właściwości mechaniczne ścianek tej rury zmieniają się wzdłuż jej osi. Podobne interferogramy holograficzne do przedstawionych na rys. 5.13 uzyskano dla rur obciążanych według SPOSOBU III z użyciem gumy.

Wzór mozaikowy, liczba i rozmieszczenie przepłotów wpływają na nierównomierność przemieszczeń lokalnych nawijanego cylindra ciśnieniowego. Rozkład przemieszczeń zarejestrowany dla N_r1 wskazuje na występowanie miejscowych przewężeń na długości rury. Rozmieszczenie przewężeń jest zgodne z występowaniem

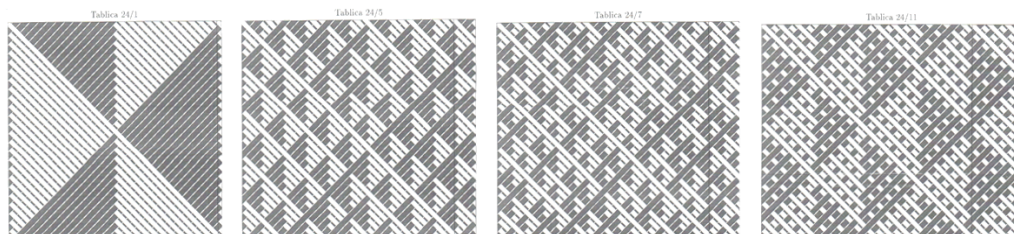


Rys. 5.13. Wyniki badań metodą interferometrii holograficznej:

- a) wykresy przemieszczeń ścianek rur z wzorem N_{r1} i N_{r5} dla ciśnienia 50 barów z przyrostem 1 bar w funkcji długości rury;
- b) widoki uzyskanych interferogramów holograficznych dla rur z wzorami N_{r1} i N_{r5} dla ciśnienia 50 barów z przyrostem 1 bara

obwodowego zgrupowania przeplotów (rys. 5.9a). Rury z wzorem N_{r5} odkształcają się równomiernie, co jest widoczne, gdy porównamy krzywe z rysunku 5.13a. Nieznaczne odchylenia od prostoliniowości wykresu dla rury N_{r5} wynikają z tego, że badany materiał kompozytowy sam w sobie jest niejednorodny. Ponadto mają tutaj istotne znaczenie pierwsze i ostatnie nawinięte wiązki w warstwie, które powodują skręcanie i wyginanie rury. Jest to związane z różnicą w naciągu wiązek po przeciwnych stronach rury. Wiązki te w czasie obciążania rury powodują zaburzenia przy odkształcaniu wzdłużnym.

W ramach badań wstępnych testowano ciśnieniowo standardowe próbki rurowe według tzw. standardu drezdeńskiego, o średnicy wewnętrznej 40 mm, grubości ścianki 1,5 mm i długości 162 mm. Szczegółowe wyniki badań zawarto w [97, 200]. Próbki wykonano metodą nawijania, z wykorzystaniem metody tablicowej; do wyznaczenia parametrów nawijania wykorzystano tablicę 24. Tablica ta podaje jedynie 4 różne wzory mozaikowe, a mianowicie N_{r1} , 5, 7 i 11. Na rysunku 5.14 przedstawiono schematy wzorów dobranych na próbki. Próbki wykonano na nawijarce firmy Bolenz & Schäfer, znajdującej się w TU Drezno. Próbki obciążano zgodnie ze sposobem III z użyciem elastomeru. Schemat obciążania przedstawiono na rysunku 5.10. Przeprowadzono również porównanie badań rur z użyciem



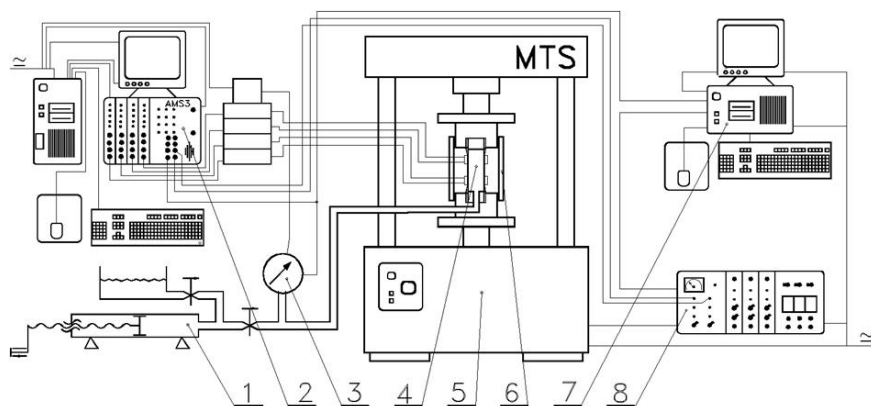
Rys. 5.14. Wzory mozaikowe dobrane dla rur z tablicy 24, a mianowicie N_r 1, 5, 7 i 11



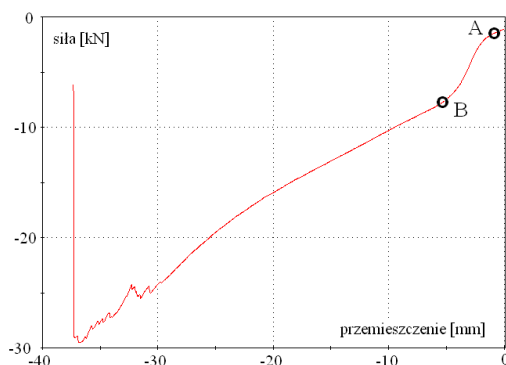
Rys. 5.15. Widoki wszystkich sześciu próbek przed i po badaniach; w kolejności, pierwsze cztery to nawijane według wzorów N_r 1, 5, 7 i 11, pozostałe dwie to wypłatane; przedostatnia zwilżana żywicą z użyciem wałka i ostatnia formowana ciśnieniowo metodą RTM

cieczy (sposób III dla cieczy). Nie stwierdzono różnic w rozkładzie naprężeń, sposobie niszczenia próbek, sił niszczących itp. oraz wpływu tarcia elastomeru we wnętrzu próbki. Uznano, że wpływ smarowania i zjawisko oporów tarcia jest pomijalnie małe, sięgające maksymalnie kilku procent (por. pkt 5.3). W ramach prac z udziałem autora [20, 31, 44, 124, 126] testowano próbki rurowe w podobny sposób, w [31, 124] nawet prowadzono badania ze sprzężeniem zwrotnym, tzn. wykorzystując pulsator hydrauliczny sterowany komputerowo, dowolnie wybierano wielkość naprężeń obwodowych do wzdłużnych w celu wykreślenia pętli naprężeń. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.16. Jednak użycie cieczy komplikuje i spowalnia badania (ze względu na wymogi bezpieczeństwa oraz czas przygotowania próbki). Z tych powodów zdecydowano się na SPOSÓB III z użyciem elastomeru, tym bardziej że chodzi o badania porównawcze.

Na rysunku 5.17 przedstawiono przykładowy wykres obciążania próbki rurowej. Na wykresach widać dwa charakterystyczne punkty przegięcia. Pierwszy punkt przegięcia zaznaczony jako A, to moment wycisnienia powietrza spomiędzy krążków elastomerowych. Drugi punkt zaznaczony jako B, ważniejszy, określał moment zniszczenia połączenia międzyfazowego włókno-żywica. W pracy za kryterium



Rys. 5.16. Schemat stanowiska do obciążania rur kompozytowych w dowolnym układzie naprężeń głównych: 1 – pompa, 2 – aparatura do pomiaru efektów EA, 3 – przetwornik ciśnienia, 4 – badana rura kompozytowa, 5 – maszyna wytrzymałościowa, 6 – osłona bezpieczeństwa, 7 – komputer sterujący, 8 – mostek tensometryczny [31]



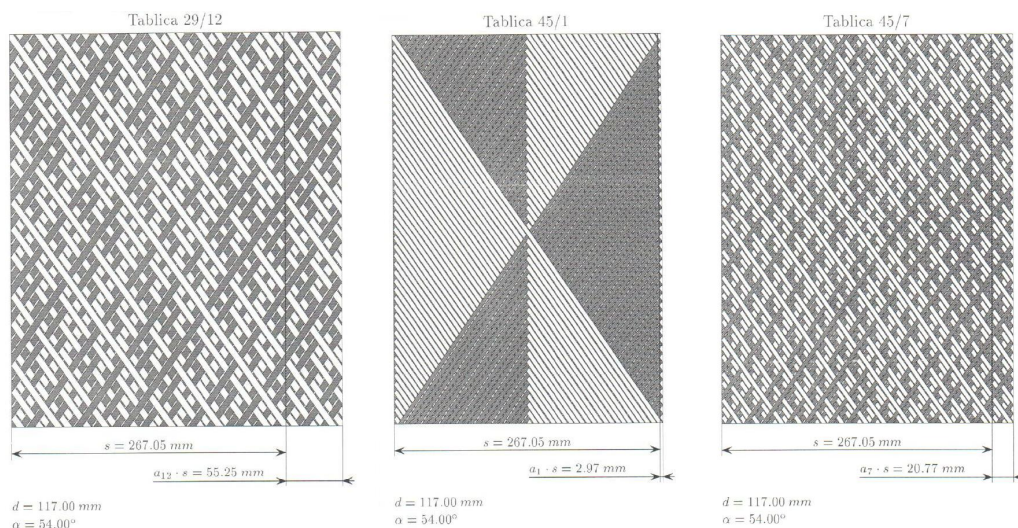
Rys. 5.17. Przykładowy wykres obciążania próbki rurowej przez ściskanie krążków gumowych wewnątrz rury: A – moment wyciśnięcia powietrza spod krążków elastomerowych, B – moment zniszczenia połączenia międzyfazowego włókno-żywica

porównawcze kolejnych typów próbek użyto zarejestrowane w czasie badań siły niszczące próbkę. Inne kryterium to porównanie wyglądu miejsc zniszczenia.

Przetestowano w sumie około 100 próbek rurowych, o kącie nawijania włókien 30° , 45° i 60° . Wszystkie typy rur ulegały zniszczeniu z dużym rozrzutem wartości sił niszczących, dla rur o kącie wzmocnienia 30° rozrzut był największy około 55%. Nie zauważono wyraźnych różnic pomiędzy badanymi sześcioma typami rur przedstawionych na rysunku 5.15. Spodziewano się znaleźć różnice w wytrzymałości niszczącej samych struktur nawijanych; jedynie dopatrzono się różnic w sposobie

Tabela 5.1. Dane opisujące wykonane butle próbne

Znak butli	Grubość kompozytu ES [mm]	Masa kompozytu w cz. walc. [kg]	Rowing [tex]	Dobry wzór rys. 5.18	Liczba wiązek w obwodzie	Liczba warstw	Ciśnienie niszczące z badań
1	5,4	4,1	2400	12/29	870	15	527
2	6,1	4,7	2400	12/29	986	17	590
3	5,3	4,2	1200	1/45	1170	13	425
4	4,9	3,8	1200	7/45	1170	13	425

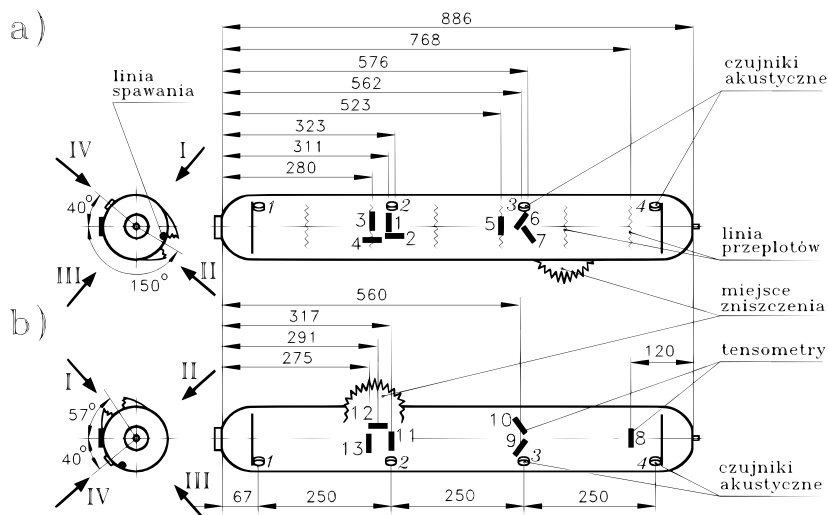


Rys. 5.18. Widoki wzorów mozaikowych badanych butli: 29/12, 1/45 i 7/45

zniszczenia próbek. Próbkę z wzorami N_r1 pękają punktowo na skrzyżowaniu linii zgrupowania przeplotów i linii uskoju. Natomiast próbki ze strukturą N_r5 , 7 i 11 pękają na większej powierzchni, z towarzyszącym charakterystycznym rozwarstwieniem, oddzieleniem wierzchniej warstwy próbki.

Do przygotowania badań na potrzeby tej pracy wykorzystano doświadczenia zdobyte wcześniej przez autora i przedstawione w pracy [28]. Dotyczą one zwłaszcza badań butli. W tabeli 5.1 scharakteryzowano wykonane butle, następnie przedstawiono najważniejsze wyniki badań, natomiast szczegółowy opis badań (projektowanie, wykonanie, wyniki pomiaru EA, odkształceń różnymi metodami, zdjęcia, analizę wytrzymałościową i in.), przedstawiono w [28] oraz w innych mniejszych opracowaniach z udziałem autora: [16, 17, 21–23, 25, 27, 201, 202]. Program badań ustalono na podstawie zaleceń norm amerykańskich [154, 225–227].

Największe odkształcenia butli **3** zarejestrowano na tensometrze 1 (rys. 5.19). Odkształcenia te były większe od odkształceń tensometru 3, który naklejono na linii przeplotów. Taki wynik porównawczy jest zgodny z wynikami badań odkształceń metodą interferometrii holograficznej przedstawionymi w punkcie

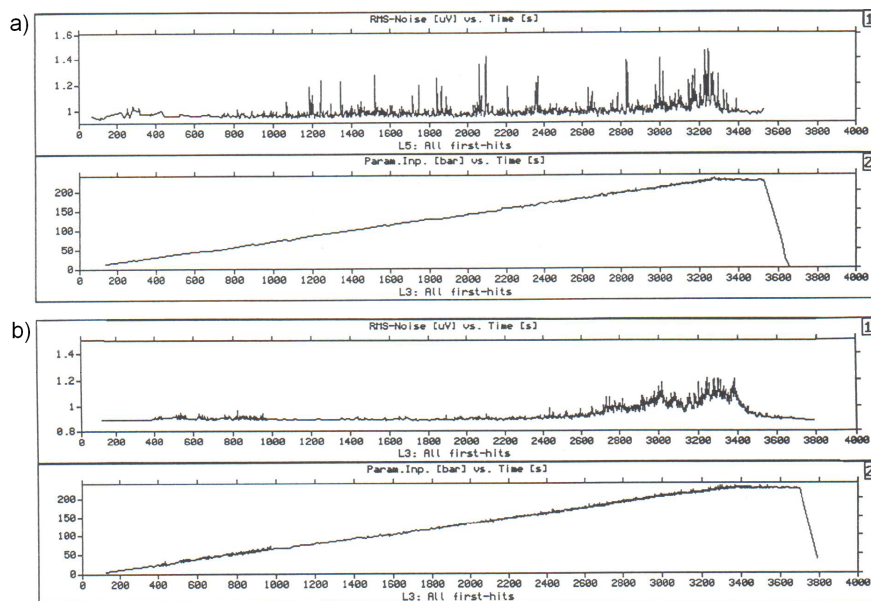


Rys. 5.19. Schemat rozmieszczenia oraz kierunki ułożenia tensometrów na powierzchni butli 3 (a) i butli 4 (b) scharakteryzowanych w tabeli 5.1

5.3. Podane odkształcenia (butla 3, tensometr 1) są większe niż podobne dla butli 4 (tensometry 8, 11 i 13) o około 50%. Relacje pomiędzy odkształceniami rejestrowanymi z pozostałych tensometrów korelują z podaną tendencją.

Konstrukcja butli złożona ze stalowego zbiornika wewnętrznego i opłotu ES nie jest dobrym układem ze względu na nośność i obciążenia zmęczeniowe. Przy ciśnieniu około 170 barów następuje zakrzywienie wykresu, w stali następują odkształcenia plastyczne. Takie zakrzywienie jest traktowane jako wystąpienie pierwszych uszkodzeń materiału ES, odpowiadające granicy plastyczności w metalach. Również przy ciśnieniu około 170 barów obserwowano nasilenie EA. Ciśnienie pracy takiej butli powinno wynosić nie więcej niż 113 barów (przy współczynniku bezpieczeństwa 1,5). Ciśnienie to można zwiększyć, stosując inny materiał linera, który później osiąga stan plastyczny, np. aluminium, a najlepiej tworzywo sztuczne lub inne włókno w konstrukcji płaszcza nośnego, które ma większy moduł sprężystości wzdłużnej E (np. włókno węglowe).

W pierwszym etapie obciążania butli można zauważyć znaczną różnicę w wyglądzie wykresów RMS (rys. 5.20). Wykresy RMS dla butli 3 zawierają charakterystyczne piki (kaskady) na całej długości krzywej. Może to być interpretowane jako pękanie niektórych włókien wzmocnienia lub jest to wynikiem powstawania długich pęknięć w obszarach bez przepływów wzoru N_r1 pomiędzy liniami zgrupowania przepływów. Zniszczenie nie mogło nastąpić na linii zgrupowania przepływów, znajdującej się w końcowej części butli 3 (rys. 5.19). Odległość pomiędzy tą linią przepływów a dennicą butli jest zbyt mała. Nie rozwinęły się tam dostatecznie duże pęknięcia wzdłużne. Takie pęknięcia powstały po obu stronach następnej linii



Rys. 5.20. Wykresy zależności RMS pierwszego etapu obciążania od czasu:
a) czujnik 4 butli **3** oraz b) czujnik 2 butli **4**. W okolicach tych czujników
nastąpiło zniszczenie butli. Wykresy dolne obrazują ciśnienie panujące w butlach

zgrupowania przeplotów, gdzie nastąpiło zniszczenie. Sytuacja taka nie zaistniała w butli **4**, ponieważ średnia długość wiązki nieprzeplecionej $\bar{l}$ jest znacznie krótsza w porównaniu z butlą **3**, a przeploty są rozproszone.

Po obciążeniu wszystkich butli, zwłaszcza w końcowym etapie, można było usłyszeć liczne „trzaski” kompozytowego płaszcza nośnego. Na podstawie narażającego charakterystycznego efektu akustycznego w sposób wykładniczy można było około 15 s przed zniszczeniem przewidzieć moment rozerwania. Butla **3** zachowywała się inaczej niż pozostałe butle. Jej zniszczenie nie było poprzedzone tak wyraźnymi trzaskami i nastąpiło nagle.

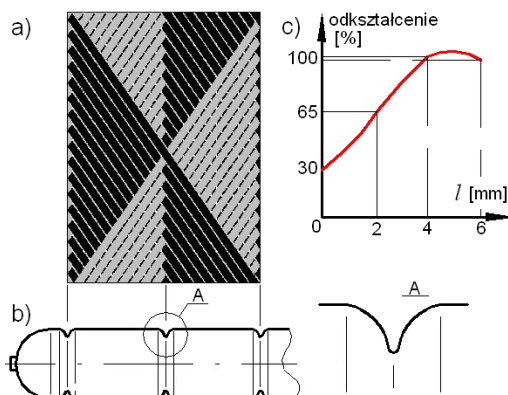
W laboratorium ILK TU Drezno wykonano 3 butle kompozytowe, wykorzystując nawijkarkę badawczą firmy Bolenz&Schäfer (rys. 5.21). Butle zaprojektowano zgodnie z punktem 6.1, s. 101. Wykonano butle według wzoru N_{r1} , N_{r2} i N_{r6} , o tym samym wzmocnieniu (ta sama ilość włókna pod tym samym kątem). Oplot nośny wykonano z włókna szklanego (4 wiązki, tex 2400) nawiniętego pod kątem 54° względem osi butli. Z użyciem dostępnych metod badawczych (EA, ŚSB, badania niszczące) próbowano porównać wykonane butle według trzech różnych wzorów N_{r1} , N_{r2} , N_{r6} , jednak nie zauważono różnic. Skupiono się na badaniach odkształceń na linii zgrupowania przeplotów i uskoków w porównaniu z odkształceniami poza tymi liniami. Okazało się, że różnic odkształceń nie ma przy wzorach N_{r2} i N_{r6} , natomiast na powierzchni butli z wzorem N_{r1} przeprowadzono pomiary



Rys. 5.21. Wytwarzanie butli z użyciem nawijarki firmy Bolenz & Schäfer w laboratorium ILK TU Drezno

odkształceń, które pozwoliły na wykreślenie krzywej odkształcenia na tzw. linii zgrupowania przeplotów (rys. 5.22). Wzór N_r1 charakteryzuje się gęsto upakowanymi tzw. liniami zgrupowania przeplotów, rozmieszczonymi równomiernie na części cylindrycznej butli. Badana butla zawierała takie linie w odstępach co 130,1 mm (jest to połowa skoku nawijania, średnica linera wynosi $d = 114$ mm, a kąt nawijania 54°). Pomiędzy liniami przeplotów znajdują się obszary, w których przeploty nie występują (rys. 4.23). Wyniki wcześniejszych badań butli (wykonanych wg. wzoru 45/1), zamieszczone w punkcie 5.3, s. 83, wskazują, że odkształcenia w czasie obciążania ciśnieniem wewnętrznym na liniach przeplotów są około dwukrotnie mniejsze od odkształceń występujących na obszarach pozbawionych przeplotów. Odkształcenia obwodowe mierzono z użyciem techniki tensometrycznej. Efekt ten mierzono także z użyciem ŚSB naklejonych na butli z wzorem 17/1. Zmierzony stosunek odkształceń wynosił około 1/1,5.

Na rysunku 5.22c, przedstawiono wykres zmierzonego odkształcenia za pomocą czterech tzw. światłowodowych czujników mikrougięciowych rozmieszczonych co 2 mm, począwszy od osi linii zgrupowania przeplotów. Użyte w pracy głowice, to skrócone ze sobą dwa światłowody jednomodowe o gęstości rzędu 175 skręceń na metr. W badaniach testowych zastosowano cztery głowice mikrougięciowe o długości pomiarowej około 500 mm, umożliwiające monitorowanie odkształceń na obwodzie butli, prostopadle do jego osi, w okolicach linii zgrupowania przeplotów, co opisano w publikowanych pracach z udziałem autora [49, 50]. Zmiany mocy optycznej w czujnikach są proporcjonalne do pojawiających się



Rys. 5.22. a) wzór mozaikowy 1/45 oplotu nośnego (rys. 5.18),
b) szkic odkształconej butli pod działaniem ciśnienia wewnętrznego,
c) kształt krzywej zmierzonego odkształcenia w miejscu oznaczonym szczegółem A

w wyniku działania ciśnienia wewnętrznego odkształceń oplotu kompozytowego butli. Zastosowane czujniki mikrougięciowe wymagają uprzedniego skalowania, lecz uznano, że dokładność uzyskanych wyników pomiarów za pomocą czujników mikrougięciowych na potrzeby badań porównawczych są wystarczające.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów odkształceń butli z wzorem 45/1 (rys. 5.18) można stwierdzić, że mają one niejednorodny charakter, tzn. na liniach zgrupowania przeplotów powstają przewężenia (rys. 5.22b). Głowice mikrougięciowe ze względu na niewielkie wymiary poprzeczne umożliwiają monitorowanie przewężenia obwodowego w wybranych obszarach. Czujniki te nawinięto ciasno jeden obok drugiego, podobnie jak na rysunku 6.9b. Charakteryzują się one mniejszą dokładnością pomiarową niż ŚSB. W dalszej części pracy wykorzystywano ŚSB (np. pkt 6.3).

Obserwacje porównawcze wzorów butli kompozytowych (głównie butli **3** i **4**) wykonanych metodą nawijania umożliwiają stwierdzenie, że wzór mozaikowy i rozmieszczenie przeplotów nie pozostają bez wpływu na pracę oplotu i jego wytrzymałość. Odkształcenia mierzone metodą tensometrii oporowej na powierzchni butli **3** były większe o około 30% w porównaniu z butlą **4**. Ponadto odkształcenia mierzone na linii przeplotów były mniejsze niż pomiędzy liniami przeplotów. Podobne obserwacje deformacji butli rejestrowano metodą interferometrii holograficznej. Porównawcze obserwacje wyników badań metodą EA wskazują, że butla **3** charakteryzuje się większą emisją, a zwłaszcza zdarzeń średnio- i wysokoamplitudowych. Kaskady hitów butli **3**, pochodzące od długich pęknięć rozchodzących się pomiędzy przeplotami, są około dwa razy większe. Zdarzenia akustyczne towarzyszące obciążaniu butli **3** charakteryzowały się większą energią. Podobnie jak dla rur ciśnieniowych, wyglądy miejsc zniszczenia butli różniły się. Zniszczenie

butli **3**, wzór N_r1 , nastąpiło na skrzyżowaniu linii zgrupowania przeplotów i linii spawu linera stalowego, a także w pobliżu miejsca największych naprężeń.

5.4. Podsumowanie przeglądu literatury i własnych badań pilotażowych butli i rur

- W przedstawionej literaturze nie znaleziono prac zawierających wyniki badań butli kompozytowych nawiniętych według różnych wzorów mozaikowych, a jedynie rury z niepełnym spektrum wzorów mozaikowych. Nie znaleziono także pracy, która bada butle czy rury ciśnieniowe wytwarzane według parametrów przemysłowych, tzn. nawijanych wiązką co najmniej kilkunastomilimetrową.
- Wyniki badań pilotażowych butli i rur świadczą o odmiennych mechanizmach niszczenia materiału kompozytowego, zależnie od użytego wzoru mozaikowego. Na tym etapie nie można stwierdzić jednoznacznie, jaka jest tendencja i wskazać kierunku wyboru czy scharakteryzować najlepszego wzoru dla cylindrycznych elementów ciśnieniowych.
- Po analizie wyników badań rur na skręcanie odpowiedź jest jednoznaczna: najwyższą wytrzymałością charakteryzują się wzory N_r4 (rys. 4.11). W badaniach ciśnieniowych jednoznaczne stwierdzenie jest trudne ze względu na inny charakter obciążania wiązek, które są rozciągane oraz poddane dużym naciskom od wewnątrz.
- Przedstawiony przykład zastosowania autorskiej metody tablicowej do projektowania elementów nawijanych, z pełnym spektrum możliwych do osiągnięcia wzorów mozaikowych o tym samym wzmocnieniu, wskazuje, że możliwość doboru wzoru jest ważnym zagadnieniem w planowaniu eksperymentu, programowaniu materiału kompozytowego, ale, jak na razie, pełne sprawdzenie uzyskano tylko dla rur skręcanych.
- Uznano za celowe poszerzenie badań o większą licznosc próbek butli oraz z większą paletą wzorów mozaikowych. Badania te przedstawiono w następnym rozdziale.

6. Badania butli kompozytowych wzmocnionych według różnych wzorów mozaikowych

Zasadniczym problemem w badaniach zbiorników ciśnieniowych z opłotem kompozytowym jest ustalenie zakresu badań, jak i wybór metod testowania ich właściwości. Do ustalenia planu badań i jego realizacji wykorzystano doświadczenia własne oraz materiał zawarty w pracy [147]. W Centrum NASA wykonuje się wiele badań nieniszczących na zbiornikach kompozytowych, które mają na celu monitorowanie zmian w materiale kompozytowym. Wykonane badania umożliwiły opracowanie i przedstawienie w pracy [147] zaleceń i wskazówek odnośnie do prowadzenia testów ze zbiornikami, jak również omówienie potencjalnych możliwości określania żywotności zbiorników kompozytowych z opłotem na całej powierzchni. W powołaniu się na inne analizy wykonane przez NASA stwierdzono, że stosuje się kilka modeli obliczeniowych symulowania zniszczenia z myślą o poprawie bezpieczeństwa użytkowania zbiorników. Obecnie trwają prace związane z analizą statystyczną, której celem jest sprawdzenie jakości tych modeli. Jak na razie nie ma zwalidowanego sposobu numerycznej symulacji lub metody kontroli, która umożliwia przewidzenie przyszłego zniszczenia w wyniku utrzymywania obciążenia w zbiorniku – zniszczenie naprężeniowe. W pracy [147] omówiono najważniejsze metody nieniszczące stosowane przez NASA specjalnie do zbiorników kompozytowych. Przedstawiono wady i zalety tych metod, zalecenia związane z umiejscowieniem czujników, prowadzeniem badań, spodziewanych efektów itd. Praca [147] jest bardzo cennym przewodnikiem w badaniu kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych.

W ramach tego rozdziału badano wpływ ułożenia nawijanych wiązek włókna szklanego i węglowego w oplocie nośnym butli wysokociśnieniowych na wytrzymałość statyczną i zmęczeniową [72]. Poszukiwano optymalnego wzoru mozaikowego ułożonego w oplocie nośnym butli kompozytowych. Wykonano metodą nawijania i zbadano ciśnieniowo takie cylindryczne obiekty próbne, jak kompozytowe próbki rurowe, butle typu 3 z linerem stalowym oraz butle typu 4 z linerem PE. Przygotowane obiekty badawcze różniły się sposobem ułożenia wiązek włókna, zgodnie z założeniami metody tablicowej (pkt 4.2). Zbadano w sumie około 100 butli kompozytowych, które były wykonane według różnych rodzajów wzorów mozaikowych, przy tym samym kącie nawijania równym 54° .

Dla badanych zbiorników i rur podano parametry nawijania siedemnastu wiązek na obwodzie rdzenia tak, aby uzyskać wszystkie możliwe wzory mozaikowe z wykorzystaniem metody tablicowej. Wiadomo, że różnych wzorów przy tym samym wzmocnieniu jest 8. Inne parametry nawijania, jak kąt, szerokość wiązki, średnica i długość elementu nawijanego są dalszymi, szczegółowymi danymi, które dla tych ośmiu wzorów są jednakowe.

W czasie badań wykorzystano takie techniki badawcze, jak emisja akustyczna, elastooptyczna metoda warstwy powierzchniowej do pomiaru odkształceń powierzchni kompozytowych oplotów nośnych w czasie badań statycznych, pomiar odkształceń z wykorzystaniem ŚSB, metoda termograficzna do pomiaru rozkładu temperatur na powierzchni oplotów nośnych w czasie badań zmęzeniowych oraz inne techniki.

Podjęto próbę wykonania modeli obliczeniowych, które przedstawiono w ostatnim podrozdziale – 6.10. Są to trzy propozycje – metoda homogenizacji, analiza fraktalna i wykorzystanie automatów komórkowych w modelowaniu materiałów kompozytowych. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań sformułowano wnioski (rozdz. 7).

Na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń, na bogatym i unikatowym materiale badawczym opartym na obiektach wytworzonych z udziałem opracowanych algorytmów metody tablicowej oraz użytych metod badawczych, zaproponowano oryginalną konstrukcję bezdętkową butli czwartej generacji. Butla ta jest obecnie badana i udoskonalana, a przewidywane efekty polegające na podwyższeniu wytrzymałości właściwej wydają się obiecujące i możliwe do aplikacji w przemyśle.

Przy okazji wspólnej realizacji projektów europejskich (6PRUE – StorHy, 7PRUE – InGAS, HYCOMP, HyCube, COPERNIC i in.) z renomowanymi ośrodkami badawczymi i wytwarzającymi omawiane zbiorniki autor miał możliwość uczestniczenia w pracach podwyższających parametry użytkowe zbiorników kompozytowych do gromadzenia sprężonego wodoru i metanu oraz zapoznał się z najnowocześniejszymi osiągnięciami w tej dziedzinie. Jak wspomniano we wstępie (por. pkt 1.2, s. 14 oraz tab. 1.2, s. 13), analiza w zakresie budowy butli kompozytowych, a także stosowanych struktur kompozytowej warstwy nośnej zbiorników, zarówno CNG jak i CH₂, wytwarzanych przez renomowane firmy światowe, potwierdza, że każda firma stosuje inny sposób ułożenia włókien. Natomiast nie występują różnice w stosowanych materiałach, zarówno na liner jak i na oplot. Obecnie najpopularniejsze materiały to włókno węglowe oraz liner z aluminium lub tworzywa termoplastycznego. Natomiast znaczne rozbieżności zaobserwowano w nawiniętej strukturze kompozytowej warstwy nośnej zbiorników, pochodzących od wielu producentów. Dotyczy to głównie liczby i grubości nawiniętych warstw, kąta nawijania poszczególnych warstw, ich sekwencji, wykończenia powierzchni zewnętrznej itd. Oznacza to, że nie ma powszechnie znanych i udokumentowanych

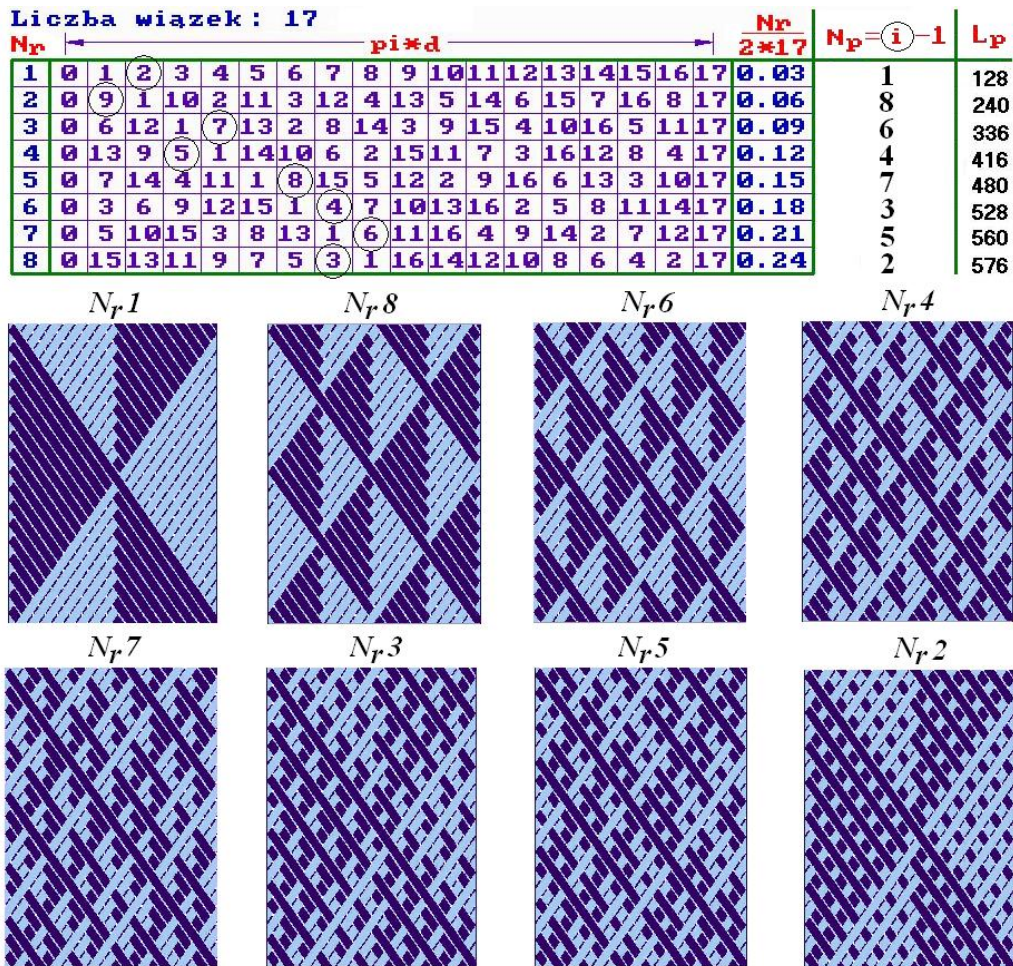
metod wyboru i wyznaczania struktur kompozytowej warstwy nośnej. Należy także dodać, że problem struktury nawijanej warstwy nośnej zauważono wcześniej, a wielu badaczy próbowało go rozwiązać, jednakże dotychczasowe rezultaty są bardzo niezadowalające. Problem ten okazuje się jest bardzo ważny, szczególnie podczas projektowania butli kompozytowych tzw. czwartej generacji, przeznaczonych do magazynowania w pojazdach wysoko sprężonego wodoru pod ciśnieniem pracy 700 barów.

Autor uważa za wskazane podkreślić, że zarówno przed rozpoczęciem prac badawczych, jak i w trakcie ich realizacji, prowadzone było rozpoznanie literatury związanej tematycznie z pracą (pkt 5.1). Nigdzie nie znaleziono doniesień, aby były prowadzone podobne badania na zbiornikach kompozytowych i na taką skalę jak w niniejszej pracy. Oprócz zagadnień szeroko omówionych w dalszej części pracy, autorowi zależy, aby zwrócić uwagę na wiele wykonanych zadań, których nie ujęto ze względu na obszerność opisu i mały związek z postawionymi тезami. Najważniejsze z tych zadań opisano w opublikowanych pracach autora [72, 79, 85].

6.1. Charakterystyka i wykonanie obiektów badań

Obiektami była grupa butli z oplotem reprezentującym pełne spektrum możliwych wzorów mozaikowych. Na rysunku 6.1 przedstawiono osiem wzorów mozaikowych z tablicy 17, czyli siedemnaście wiązek na obwodzie części walcowej butli. Na rysunku 6.2 przedstawiono krzywą liczby przeplotów w zależności od wzorów uszeregowanych od N_71 do N_72 (w kolejności od najmniejszej do największej liczby przeplotów).

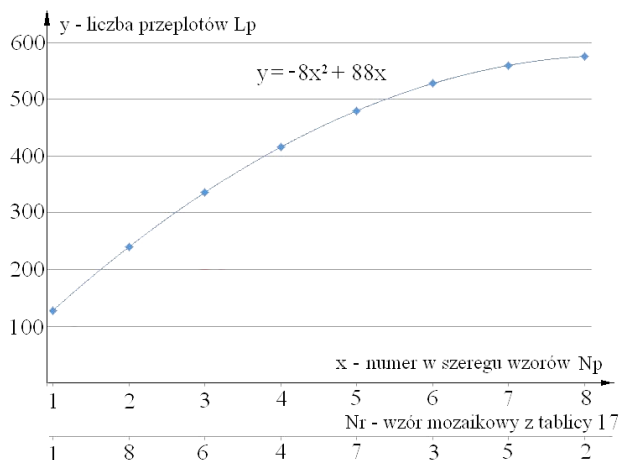
Jak wspomniano we wstępie, algorytm komercyjnych oprogramowań komputerowych, wspomagających projektowanie i wytwarzanie elementów nawijanych, nie daje możliwości przedstawienia wszystkich struktur z grupy. Jest on przygotowany do aplikacji przemysłowych, co wymaga wygenerowania kilku struktur, jak najszybszego ich „przedstawienia” graficznego oraz wykonania z użyciem sprężonej nawijarki. W metodzie tablicowej, którą opracował i wykorzystał autor do swoich badań nad optymalizacją struktur nawijanych (pkt 4.2) podejście do projektowania jest metodologiczne. Oznacza to, że w czasie projektowania elementów nawijanych, w przeciwieństwie do innych procedur stosowanych w przemyśle, w pierwszej kolejności należy określić kąt nawijania, średnicę części walcowej butli i szerokość wiązki, a następnie dobrać wzór mozaikowy. Wyjaśniono to w rozdziale 4 oraz w opublikowanych pracach z udziałem autora [54, 58, 59, 64, 67]. W komercyjnych algorytmach często nie bierze się niektórych struktur pod uwagę, ponieważ liner jest już gotowy. Oznacza to, że w proponowanej przez autora procedurze najważniejsze jest zaprojektowanie oplotu; projektowanie lineru jest drugim etapem. Użyte w pracy linery miały te same gabaryty, jednak dodatkową trudność stanowiło



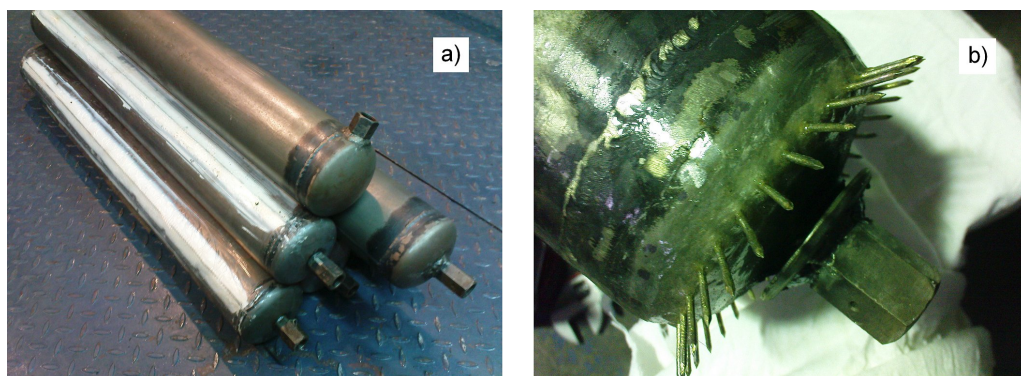
Rys. 6.1. Tablica dla 17 wiązek na obwodzie części cylindrycznej oraz 8 wzorów mozaikowych, które wygenerowano dla 17 wiązek na obwodzie części walcowej, zgodnie z algorytmem przedstawionym w punkcie 4.2. Rysunki wykonano według programu scharakteryzowanego w punkcie 4.2.6

wykonanie butli według jednego typu ułożenia wiązek, tzn. że same dennice musiały być dodatkowo wzmocnione. W pracy badano części walcowe butli.

W celu wytworzenia butli próbných w pierwszej kolejności wykonano linery stalowe o objętości 10 litrów. Idee wytworzenia butli typu 3 zaczerpnięto z [168] oraz doświadczeń własnych opisanych w punkcie 5.3. Część walcowa linerów była zwijana z blachy stalowej i spawana wzdłuż tworzącej walca z wykorzystaniem automatu spawalniczego. Dennice były wytwarzane metodą tłoczenia, a następnie – w części środkowej – spawany był wcześniej wykonany króciec wyjściowy. Tak



Rys. 6.2. Krzywa liczby przeplotów w zależności od wzorów uszeregowanych od $N_{r,1}$ do $N_{r,2}$ (w kolejności od najmniejszej do największej liczby przeplotów)



Rys. 6.3. Widok linerów metalowych: a) u góry stosu, liner prototypowy z króćcem bocznym; liner wysunięty ze stosu ma standardową dennicę, pozostałe mają dennice pogrubione i wyrównane szpachlą spoiny wzdłużnej części walcowej; b) widok tzw. jeża uformowanego na dennicy

przygotowane dennice były z kolei dospawane (w oprzyrządowaniu centrującym) do części cylindrycznej. Po sprawdzeniu szczelności liner był pokostowany wewnątrz, w celu wytworzenia powłoki zabezpieczającej przed korozją i ewentualnymi mikronieszczelnościami. Kilka linerów przedstawiono na rysunku 6.3.

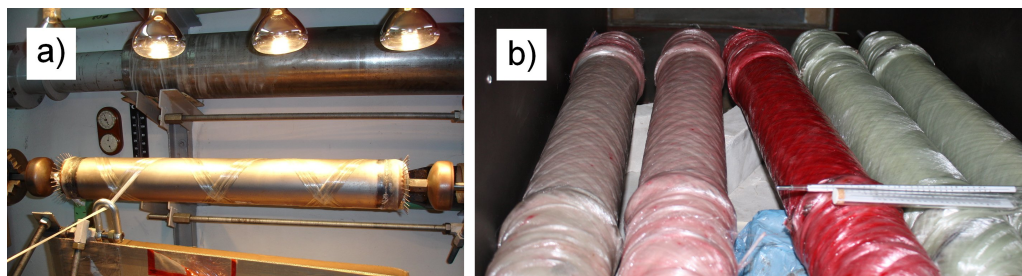
Główne argumenty przemawiające za użyciem w pracy linerów stalowych spawanych:

- są pewne i tanie, łatwe do wykonania przez jednego dostawcę, do sprawdzenia pod względem szczelności i ewentualnych napraw, odporne na degradację mate-

riału, odporne na uderzenia oraz ewentualne nieosiowe ich ułożenie w nawijarce czy suszarce,

- są bardzo sztywne w czasie nawijania; można wówczas testować duże naciągi włókna,
- są odporne na temperaturę wygrzewania (która np. w prototypach z line-rem termoplastycznym może powodować degradację materiału lub odspojenie tworzywa od króćca),
- kompozyt ES dobrze łączy się z odtłuszczonym metalem.

W warunkach przemysłowych opłoty nośne wykonuje się z użyciem co najmniej dwóch warstw – obwodowej i wzdłużnej – ponieważ warstwy wzdłużne zapewniają pokrycie dennic, a warstwy obwodowe – wzmocnienie najbardziej wyętego kierunku obwodowego butli. Podczas wykonywania obiektów badań najważniejsze było wykonanie jednego typu warstwy ułożonej pod teoretycznie optymalnym kątem nawijania 54° oraz uzyskanie pokrycia i wzmocnienia dennic. Utrudnieniem było uzyskanie, przy tym kącie, ośmiu różnych struktur nawijania (rys. 6.1). Przy kącie nawijania 54° nie da się w całości pokryć dennic butli. Wiązki włókien ułożone na dennicy nie będą pokrywać butli. Wiązki ułożone na dennicy nie będą pokrywać obszaru przy króćcu wyjściowym. W tym celu na dennicach linerów przygotowywano tzw. jeże, zaczepy dla nawijanych wiązek włókna (rys. 6.3 i 6.4). Dzięki takiemu rozwiązaniu wiązki włókna nie zsuwały się na dennicy, nieznacznie tylko zmieniały kąt nawijania (właśnie na jeżu) oraz pokrywały dennicę, dając jej wzmocnienie. Jednak w wyniku nawijania stosunkowo grubą wiązką w okolicy jeża na skrzyżowaniach wiązek powstawały przestrzenie bez wzmocnienia, które osłabiały materiał na dennicy. Spowodowało to rozszczelnienie kilku badanych butli na dennicach. To rozwiązanie sprawdzono w badaniach dotyczących butli i przedstawionych w podrozdziale 5.3, gdzie użyto wiązki znacznie cieńszej. Nawijano wtedy według wzorów z tablicy 45, użyto jednego rowingu tex 1200 g/km. Wiązka ta dobrze się układała, powstałe niewypełnione miejsca skrzyżowań na dennicach były małe i bez większego znaczenia dla wytrzymałości wzmocnienia dennicy. Natomiast w tych badaniach użyto wiązki 10 razy grubszej (wybrano wzory z tablicy 17, wiązkę złożoną z pięciu rowingów tex 2400 g/km), w celu możliwości porównywania wyników badań do rzeczywistych warunków przemysłowego wytwarzania butli. Okazało się, że miejsca skrzyżowań dużych wiązek na dennicy były zbyt obszerne, często nie wypełnione żywicą. W niektórych butlach doprowadzało to do nadmiernego odkształcenia dennicy oraz w efekcie do rozszczelnienia butli. Jest to bardzo ważne spostrzeżenie wyjaśniające w dalszej części pracy niekorzystny wpływ przepłotów w strukturze nośnej butli nawijanych grubszą wiązką. W celu uniknięcia pęknięcia na dennicy, nawijano dodatkowe wzmocnienie na końcach butli, dlatego butle próbne mają na końcach widoczne pogrubienia (rys. 6.4).



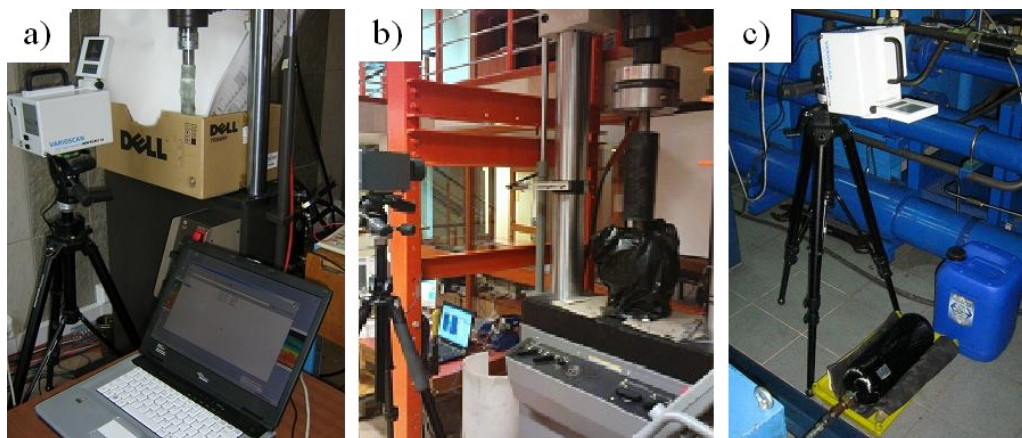
Rys. 6.4. Produkcja butli: a) widok linera z żezami w czasie nawijania;
b) przykładowa partia wykonanych butli w czasie tzw. wygrzewania dotwardzającego

Dobrano następujący rowing szklany, kompozycję żywiczną oraz temperatury przetwórstwa i reżimy utwardzania:

- rowing szklany – typ E10, TEX 2400 [g/km], typ 3005, produkcji Vetrotex,
- żywica epoksydowa – EPOLAM 5015, produkcji AXON,
- utwardzacz – EPOLAM 5016, produkcji AXON,
- proces nawijania w temperaturze 35 °C, w czasie nieprzekraczającym 2 godz.,
- podtwardzanie w temperaturze 25 °C, 24 godz. (przez pierwsze 4 godz. prowadzono utwardzanie w ruchu obrotowym, w celu uniknięcia spływania syciwa),
- utwardzanie w 70 °C przez 16 godz.

6.2. Badania zmęczeniowe butli

Przed przystąpieniem do badań zmęczeniowych butle próbne obciążano statycznie do ciśnienia 300 barów. W czasie obciążania mierzono sygnały: EA, odkształcenia powierzchni butli z użyciem tensometrów i ŚSB, a dla jednej butli dokonywano pomiaru odkształceń skomputeryzowaną metodą interferometrycznych obrazów plamkowych, która charakteryzuje się bardzo dużą wrażliwością pomiaru na sposób zamocowania próbki. Metoda ta okazała się nieefektywna w tych badaniach, ponieważ bardzo złożony stan odkształcenia butli uniemożliwiał dokonanie pomiaru. Stwierdzono jedynie, że cała butla ulega wygięciu oraz skręceniu w wyniku nawinięcia ostatniej wiązki, która daje wyraźne, niesymetryczne wzmocnienie. Po przeprowadzeniu wymienionych badań statycznych na wykonanych butlach, przeprowadzono badania zmęczeniowe. Butle obciążano ciśnieniem 20–200 barów z częstotliwością do 10 cykli na minutę – np. zgodnie z normą [206] i innymi zamieszczonymi w spisie norm (por. s. 162). Niestety, nie udało się zarejestrować zmian temperatury na powierzchni butli wszystkich ośmiu struktur za pomocą kamery termowizyjnej (rys. 6.5.c). Próbowano także zwiększać ciśnienie do około 300 barów oraz częstotliwość do 14 cykli na minutę (maksymalne parametry uniikatowego urządzenia KODAL), jednak dalej nie rejestrowano zmiany temperatury



Rys. 6.5. Widoki stanowisk do ciśnieniowych badań zmęczeniowych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej:
 a) małej próbki rurowej z wykorzystaniem pulsatora MTS,
 b) części cylindrycznej butli z wykorzystaniem pulsatora MTS,
 c) butli wzmocnionej włóknem węglowym z wykorzystaniem pulsatora hydraulicznego KODAL

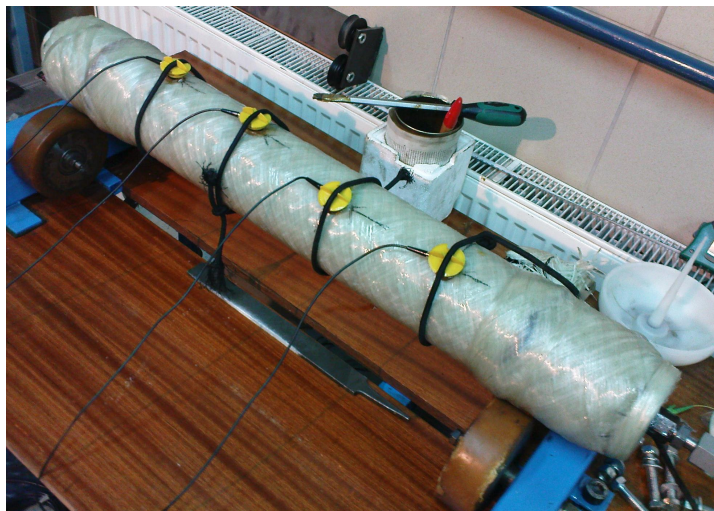
powstałej w wyniku pracy wiązek wzmocnienia opłotu nośnego. Uznano zatem, że takie badania są niecelowe. W tej sytuacji zdecydowano się na nienormowane badania zmęczeniowe z wykorzystaniem pulsatora hydraulicznego MTS 810 i gumy jako medium roboczego (rys. 6.5.a i b). Na tym stanowisku uzyskano częstotliwość 120 cykli na minutę(!), co pozwoliło zarejestrować obraz zmian temperatury na powierzchni próbki. Wyniki badań przedstawiono w punkcie 6.6.

6.3. Analiza uzyskanych wyników

W czasie badań użyto techniki wymienionej poniżej wraz z charakterystyką uzyskanego efektu pomiaru.

Metoda emisji akustycznej (EA), opisana w [28, 81]

W czasie wstępnego obciążania butli przymocowywano cztery równomiernie rozmieszczone czujniki akustyczne wzdłuż tworzącej części walcowej (rys. 6.6), natomiast w czasie badań niszczących tylko dwa. Taki system rozmieszczania czujników gwarantował pełny nadzór nad częścią walcową butli. Do rejestracji sygnałów używano układu liniowego. W wyniku przeprowadzonych pomiarów zauważono różnice w sygnałach EA pomiędzy butlami wykonanymi według kolejnych wzorów mozaikowych. Szczegółowo badania opisano w pracy [66]. Na rysunku 6.7 przedstawiono w formie wykresów wyniki badań EA dwóch butli charakteryzujących się skrajnymi wzorami mozaikowymi – N_{r2} z dużą liczbą



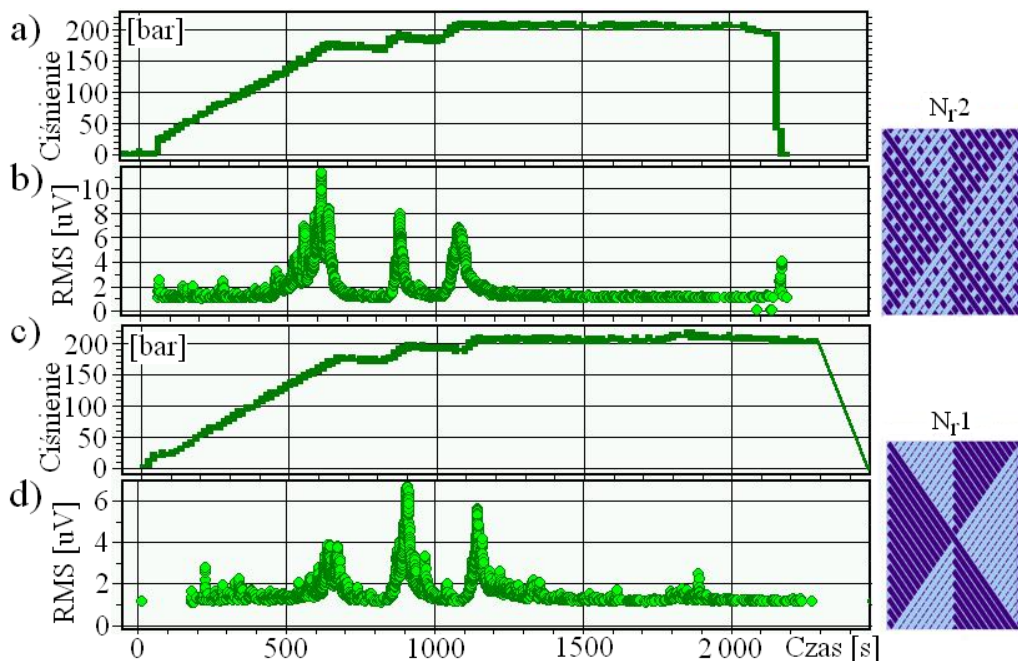
Rys. 6.6. Widok butli w czasie pomiaru efektów EA

przeplotów oraz $N_{r,1}$ z małą liczbą przeplotów. Widoczne są różnice w wartościach skutecznych sygnałów (RMS). Wzory o małej liczbie przeplotów w początkowym etapie obciążania charakteryzują się niższym RMS, który rośnie dopiero w drugim etapie. W przypadku struktur z dużą liczbą przeplotów sytuacja wygląda odwrotnie, przy wyższej EA. Oploty z większą liczbą przeplotów generują więcej defektów w porównaniu ze strukturami z małą liczbą przeplotów.

Na podstawie badań własnych sformułowano podobne wnioski, ale dodatkowo zaobserwowano, że materiał wykonany według wzoru $N_{r,1}$ ma jeszcze jedną ważną właściwość: ma największą zdolność do zatrzymywania powstałych długich pęknięć, które powodują także najlepsze ujednolicenie lokalnych różnic w naprężeniach w czasie obciążania.

Liczba zarejestrowanych zdarzeń akustycznych we wzorach z większą liczbą przeplotów jest także większa (rys. 6.8). Początkowo są to zdarzenia niskoamplitudowe, ale w trzecim etapie obciążania, tak jak w strukturze $N_{r,1}$, pojawiają się zdarzenia wysokoamplitudowe i jest ich więcej.

Porównanie uzyskanych danych RMS oraz liczby hitów o określonej amplitudzie potwierdza wpływ wzorów na pracę nawijanych butli kompozytowych. Wyniki badań EA są zbieżne z wynikami przedstawionymi na rysunku 5.20. Prowadzono także badania rozchodzenia się fali akustycznej w ściankach butli [22, 66]. Porównywane prędkości i spadki amplitud są funkcją zdefektowania materiału kompozytowego. Jednak uzyskane dane z wykorzystaniem tzw. autokalibracji sugerują, że pomiary spadków prędkości i tłumienia amplitud sygnałów nie nadają się do oceny zdefektowania badanych wzorów, ponieważ materiały te są bardzo dobrej jakości i ulegają poważniejszemu zniszczeniu dopiero w ostatniej



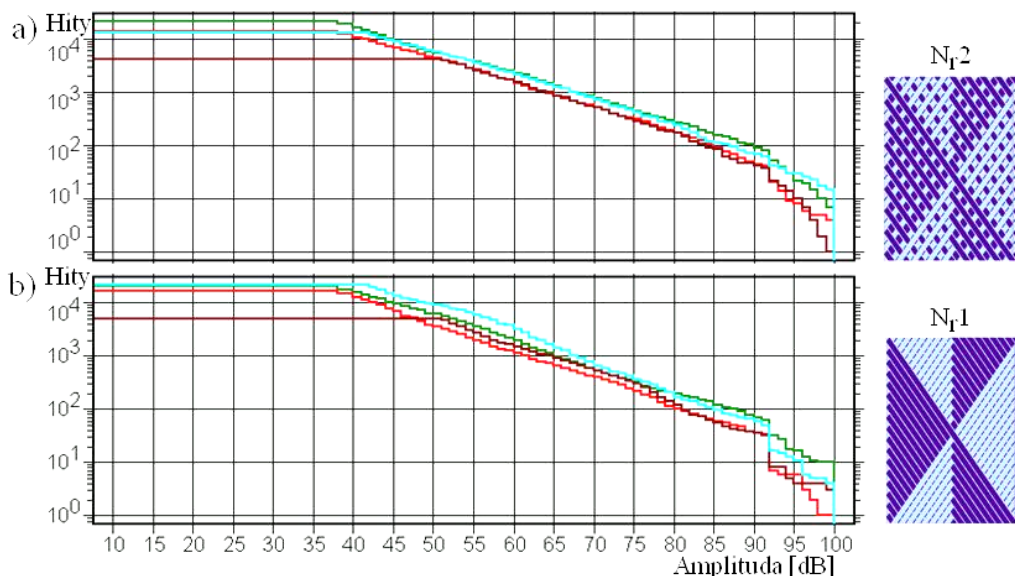
Rys. 6.7. Wykresy obciążania butli oraz ich RMS – wartości skuteczne sygnałów:
 a) i b) – wzór N_{r2} oraz c) i d) – wzór N_{r1}

fazie obciążenia. Porównanie zarejestrowanej EA w badaniach kolejnych wzorów nie przyniosło oczekiwanego efektu, dlatego zdecydowano się przedstawić dane porównawcze dla dwóch skrajnych wzorów wzmocnienia – N_{r1} i N_{r2} .

W późniejszym czasie wyniki te zostaną przetworzone statystycznie oraz wykorzystane będą do analiz z użyciem takich narzędzi, jak geometria fraktalna lub automaty komórkowe, co wyjaśniono w punkcie 6.10 oraz w opublikowanych pracach z udziałem autora [34, 36, 90].

Metoda interferometrycznych obrazów płamkowych

Butlę mocowano w specjalnym uchwycie zapewniającym dobre jednostronne utwierdzenie. Uchwyt zawierał podkładki z żywicy epoksydowej, które po uchwyceniu butli utwardzały się i zapewniały wymaganą sztywność układu. Uchwyt był przytwierdzony do metalowego stołu wykonanego z trzech ceowników 120. Z drugiego końca stołu był przytwierdzony drugi masywny uchwyt, który zapewniał sztywne utwierdzenie kamer. Tak przygotowane stanowisko eliminowało przemieszczenia obciążanej butli i kamer. Nadal jednak dokonanie pomiarów przemieszczeń było niemożliwe wskutek zbyt dużych odkształceń liniowych i obwodowych całej butli. Należy przypomnieć, że dokładność pomiaru odkształceń, a właściwie przemieszczeń tą metodą wynosi 0,001 mm. W czasie pomiarów obszar badany przemieszczał się wraz z całą butlą i „rozmywał” się, nawet przy bardzo małych



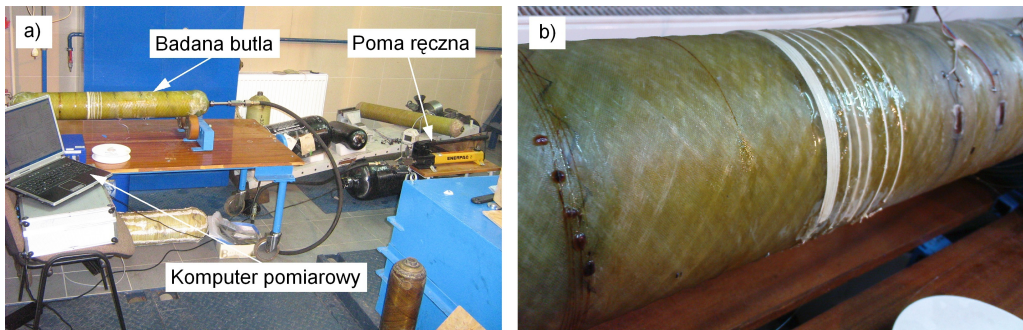
Rys. 6.8. Wykresy sekwencji amplitud (liczby hitów o określonej amplitudzie):

a) z dużą liczbą przeplotów – N_T2 ; b) z małą liczbą przeplotów – N_T1
(sporządzone z danych rys. 6.7)

przyrostach ciśnienia. Było to związane ze wzmocnieniem, jakie dają ostatnie nawinięte wiązki, powodujące zginanie i skręcanie całej butli w uchwycie. Uznano, że metoda interferometrycznych obrazów plamkowych zostanie w tej sytuacji zarzucona, a zamiast niej zostanie użyta metoda elastooptyczna – metoda warstwy powierzchniowej (EMWP), którą opisano w punkcie 6.7 oraz w [71]. Metoda ta okazała się bardzo użyteczna w badaniach opłotów nośnych wykonanych według wzorów mozaikowych.

Pomiar odkształceń za pomocą światłowodowych siatek Bragga (ŚSB)

Układ ten okazał się bardzo przydatny do pomiaru odkształceń, ponieważ charakteryzuje się tzw. bardzo małą (wąską i krótką) bazą pomiarową i dużymi odkształceniami – do 5%. Zazwyczaj stosowane tensometry są szersze i nie mają możliwości pomiaru tak dużych odkształceń, chyba że użyje się odmian do zastosowań specjalnych. Dzięki zastosowaniu czujników ŚSB było możliwe zmierzenie odkształceń w punktach charakterystycznych, szczególnie na powierzchni butli z wzorem N_T1 . Metodę uznano za szczególnie przydatną w dalszych badaniach struktur kompozytowych, zarzucono natomiast metodę pomiaru odkształceń z użyciem tzw. światłowodowych czujników mikrougięciowych, jak to wcześniej sygnalizowano w pracy, ponieważ były to czujniki prototypowe, opatrzone dużym błędem pomiaru [49, 50, 178]. Wcześniejsze eksperymenty i doniesienia literaturowe wskazywały na interesujące właściwości tych systemów czujnikowych i ich



Rys. 6.9. Stanowisko do statycznych badań ciśnieniowych butli:

- a) widoczna pompa ręczna, butla umieszczona na specjalnym stole pomiarowym, komputer pomiarowy z urządzeniami towarzyszącymi,
- b) widok części walcowej butli z czujnikami ŚSB (na pierwszym planie), mikrougięciowymi (białe paski w części środkowej) i układami tensometrycznymi

szczególną przydatność w badaniach struktur kompozytowych. Jest to związane z charakterystycznymi i jednolitymi odkształceniami obwodowymi struktur nawijanych na pełnym obwodzie. Taki, w pewnym sensie „baryłkowaty”, charakter odkształceń części walcowych butli mógł być zmierzony systemami czujnikowymi o stosunkowo długiej i wąskiej bazie pomiarowej, ponieważ wymiary tych czujników, długości nawet 1 m i szerokości dwóch światłowodów (ok. 0,2 mm), dawały możliwość pomiaru odkształceń na obwodzie butli w jak najmniejszych odstępach oraz uśrednianie zmierzonych odkształceń.

Na rysunku 6.9 przedstawiono stanowisko badawcze do badań odkształceń za pomocą tensometrów, ŚSB oraz światłowodowych czujników mikrougięciowych. Specjalny stół zawiera regulowane podpory wykonane z dwóch par miękkich rolek umożliwiających łatwy obrót butli i dojście do każdego miejsca na powierzchni, w celu np. sprawdzenia czujnika, oględzin przewodów itp.; stół został specjalnie zaprojektowany do butli o różnych gabarytach oraz do badań z rozbudowanymi systemami czujnikowymi. W wyniku przeprowadzonej analizy postanowiono wykonać pięć butli z wzorem N_r1 oraz pięć butli z wzorem N_r8 , 7, 6, 5 i 4, (rys. 6.1). Opisy badań butli z użyciem różnego typu czujników światłowodowych zawarto w opublikowanych pracach z udziałem autora: [14, 37, 39, 47, 55, 63, 75, 113, 114, 127, 177, 179] oraz w [115].

Największe różnice w odkształceniach powierzchni oplotów nośnych, rejestrowanych za pomocą ŚSB, zmierzono na powierzchni wzoru N_r1 . Odkształcenia na linii zgrupowania przeplotów były równe około 2/3 odkształceń poza liniami zgrupowania przeplotów. W kolejnych badanych wzorach przedstawionych na rysunku 6.1 różnice te były coraz mniejsze, aż we wzorze N_r2 odkształcenia powierzchni oplotów nośnych – w miarę jednolite, tzn. odkształcenia mierzone w miejscach raczej losowych (ponieważ w strukturach N_r3 , 5 i 2 nie ma linii

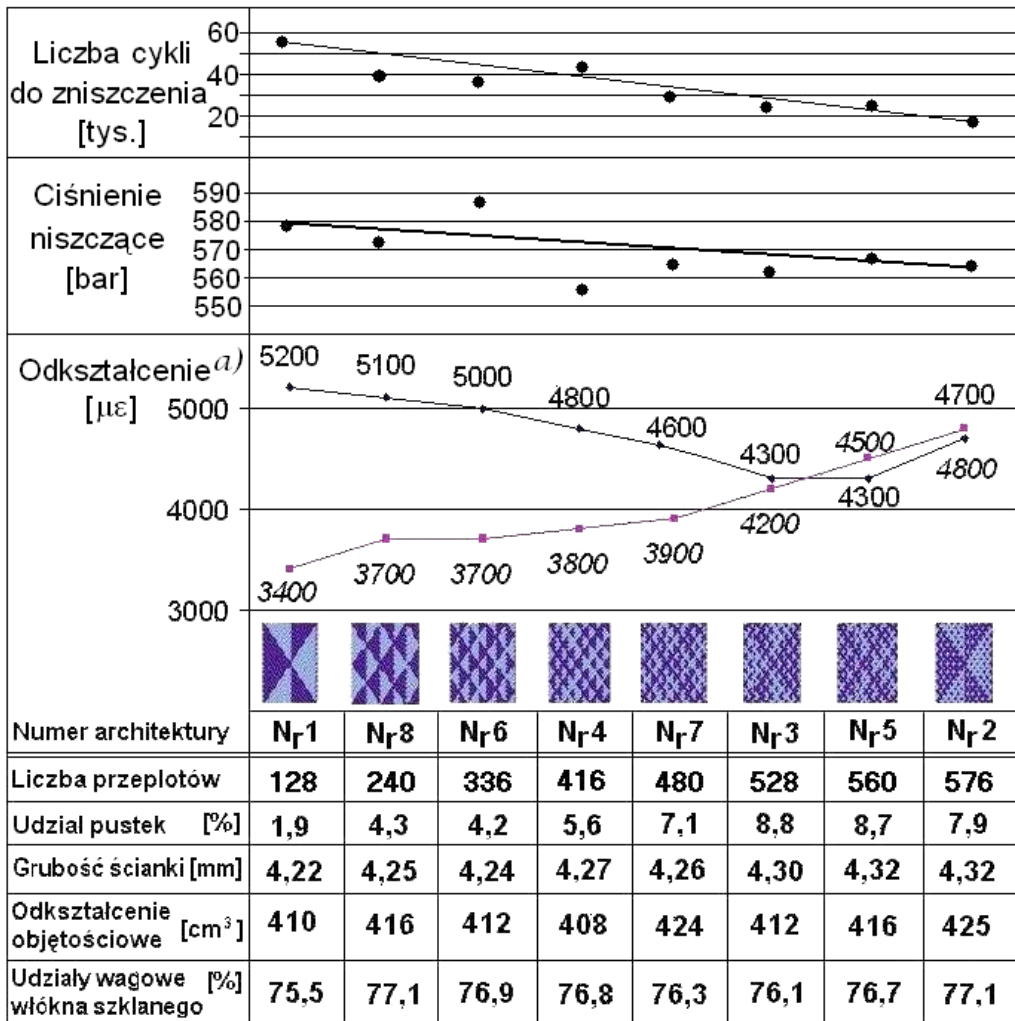
zgrupowania przeplotów) były porównywalne. Na wykresie (rys. 6.10) przedstawiono uśrednione wartości odkształceń dla kolejnych wzorów przedstawionych wcześniej (rys. 6.1). Należy zaznaczyć, że uszeregowanie wzorów (rys. 6.1, 6.10) jest wynikiem nie tylko pomiarów odkształceń, ale także jest to szereg zgodny z następującymi pomiarami:

- liczbą przeplotów wyznaczoną z autorskiej zależności 4.4, co przedstawiono na wykresie (rys. 6.2) (najmniej przeplotów zawiera N_r1 , najwięcej N_r2),
- uśrednioną grubością kompozytowego oplotu nośnego (najmniejszą grubość zawiera N_r1 , największą N_r2),
- największym udziałem żywicy (najmniej żywicy zawiera N_r1 , najwięcej N_r2),
- największym udziałem pustek (pęcherzy powietrza powstałych w wyniku spieniania się żywicy w czasie nawijania, ale głównie przez tworzenie w czasie nawijania tzw. kieszeni żywicznych pomiędzy wiązkami (rys. 4.21) zamykanych przez kolejne nawijane wiązki (najmniej pustek zawiera N_r1 , najwięcej N_r2).

W górnej części (rys. 6.10) zamieszczono także wyniki badań ciśnieniowych butli – statycznych i zmęczeniowych. Przedstawione dane również korelują z uszeregowaniem wzorów zgodnie z liczbą przeplotów.

6.4. Badania niszczące butli

Przeprowadzono badania niszczące około 50 butli, które wcześniej przebadano statycznie oraz zmęczeniowo. Wykonano do tego celu specjalną komorę bezpieczeństwa z gniazdami na falowody EA oraz pokrywą zabezpieczającą i umożliwiającą szybki dostęp do butli, jej wymianę itp. W czasie badań niszczących rejestrowano EA za pomocą dwóch czujników zamontowanych na falowodach zapewniających ochronę czujników akustycznych. Na większości butli rejestrowano odkształcenia obwodowe (na przeplotach i poza nimi), wzdłużne oraz wzdłuż włókien. Rejestrowano także krzywą narastania ciśnienia oraz wartość ciśnienia niszczącego. W tabeli 6.1 przedstawiono wyniki badań (wartości ciśnień niszczących), które skomentowano w następnym punkcie. Na rysunku 6.11 przedstawiono przykładowe zniszczenia kilku butli oraz widok wspomnianej komory bezpieczeństwa. Komorę bezpieczeństwa zaprojektowano i wykonano specjalnie do tych badań. Były to badania dużej liczby oczyjnikowanych butli w krótkim czasie, z zachowaniem pełnych zasad bezpieczeństwa i braku uszkodzeń sprzętu pomiarowego. Należy wspomnieć, że w czasie ciśnieniowego rozerwania butli wzmocnionej włóknem szklanym, z użyciem wody, powstaje mgła wodna z drobinami włókna szklanego. Dlatego komora po rozerwaniu butli i przed jej wymontowaniem musi być wewnątrz obficie spłukana (umyta) wodą, aby oczyścić ją z drobin włókna szklanego. Inne warunki, które spełnia komora zawarto w [72].

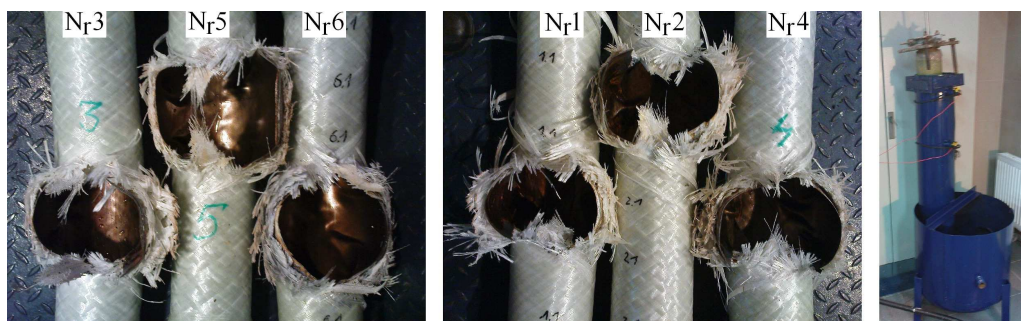


Rys. 6.10. Wykresy z danych zamieszczonych w tabelach 6.2 (średnie wartości liczby cykli do zniszczenia) i 6.1 (średnie wartości ciśnień niszczących) oraz uśrednione wartości odkształceń^a na liniach przepływów, uskoków oraz w obszarach bez przepływów (rys. 4.23) zmierzonych za pomocą ŚSB dla kolejnych badanych wzorów, pod ciśnieniem 275 barów (ok. 1/2 ciśnienia niszczącego), a także wartości innych parametrów badanych wzorów

^a Odkształcenie włókna światłowodowego wyrażone jest w jednostkach odkształcenia (ϵ , strain). W rzeczywistości jest jednostką bezwymiarową. Jeżeli dla 1 m wydłużenie wynosi 1 μ m, to rejestrowane czujnikiem odkształcenie wynosi 1 μ m/1 m = 1 $\mu\epsilon$ (mikro-strain) [115].

Tabela 6.1. Wartości ciśnień niszczących, w barach, kolejnych butli:
a) zniszczenie na dennicy, b) zniszczenie na spawie wzdłużnym lineru – brak pomiaru
(rozszerzenie poniżej ciśnienia 400 barów dotyczy także pozostałych butli
(ok. 50 szt.), które się rozszerzyły lub nie miały żadnego znaczenia
w badaniach niszczących)

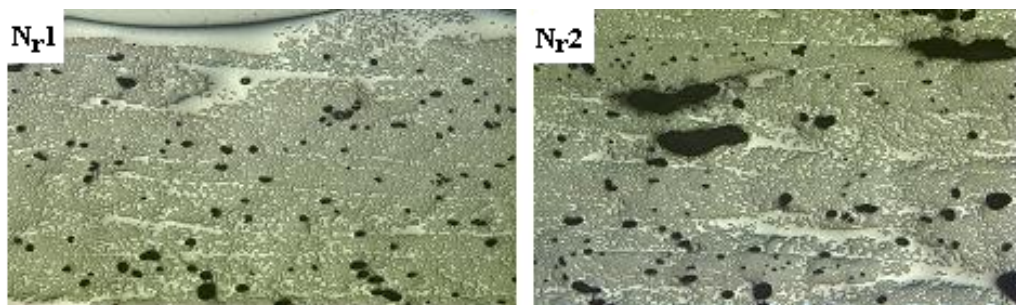
Butla	1	2	3	4	5	Średnia	Odchylenie od wartości średniej
N_r1	607	578	514	616 b	578	578,6	39,9
N_r2	556a	562 b	602	539 b	–	564,8	26,7
N_r3	504 a	569 b	610 b	564	–	561,8	43,7
N_r4	544 a	609 b	498 b	543 b	585	555,8	42,8
N_r5	506 a	566 b	598 b	595	–	566,3	42,7
N_r6	572 b	613 b	576	594 b	–	588,8	18,8
N_r7	574 b	588	508	590	–	565,0	38,7
N_r8	573	563 b	587 b	523 b	611 b	571,4	32,5



Rys. 6.11. Przykładowe zniszczenia kilku butli (numery wzoru oznaczono na butlach)
oraz po prawej stronie widok komory bezpieczeństwa

6.5. Analiza uzyskanych wyników

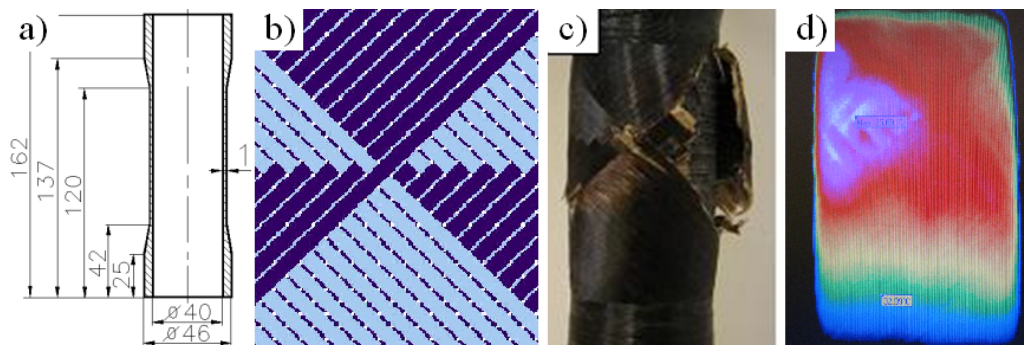
Aby zrealizować założony plan wykonano w sumie 50 kompozytowych butli o objętości 10 litrów. Następnie butle przebadano ciśnieniowo oraz przeprowadzono badania zmęczeniowe i statyczne do zniszczenia z użyciem deklarowanych wcześniej technik badawczych, takich jak termowizja, techniki optyczne, tensometria, czujniki światłowodowe, EA itp. Wyniki prac badawczych planowanych i zrealizowanych w pracy nie przyniosły oczekiwanych rezultatów, tzn. nie zauważono wyraźnych różnic w pracy kolejnych badanych ośmiu wzorów mozaikowych (rys. 6.1). Główne przyczyny uzyskania niezadowalającego wyniku badań to: zbyt duże wzmocnienie, jakie daje liner metalowy; wpływ połączenia spawanego lineru metalowego na tworzącej w części walcowej; problemy ze wzmocnieniem dennicy z zachowaniem jednego typu warstwy.



Rys. 6.12. Widok zgładów w powiększeniu $50\times$, wykonanych wzdłuż tworzącej butli (wzory N_{r1} i N_{r2}). Widoczna wyraźna różnica w zawartości pustek i żywicy; ilość pustek i ich wielkość oraz udział żywicy są zgodne z kolejnością zawartą na wykresie (rys. 6.10)

Znaleziono korelację w uzyskanych wynikach badań niszczących z szeregiem według liczby przepłotów (tab. 6.1, wykres 6.10). Liczność próby do przeprowadzenia obróbki statystycznej była mała, ale wartości średnie wskazują na większe wytrzymałości wzorów N_{r1} . Odchylenia od wartości średniej były większe od różnic między wartościami średnimi dla poszczególnych wzorów (tab. 6.1). Wyników tych nie można uznać za statystycznie istotne. Każdą przebadaną butlę w testach niszczących należy traktować indywidualnie, ponieważ jest to bardzo złożony obiekt badawczy o indywidualnej historii wytworzenia i badań (inny wzór, historia obciążania przed badaniami niszczącymi, modyfikowane linery, wpływ czynnika ludzkiego na całą historię wytworzenia butli itp.). W ramach pracy przeprowadzono także obserwacje mikroskopowe. Wykonywano zgłady w obszarach linii zgrupowania przepłotów, także maksymalnie blisko miejsca zniszczenia. Odnalezione pęknięcia nie układały się w sposób charakterystyczny dla danego wzoru. Zgłady przygotowane z próbek transparentnych, wykonywanych w ramach innych badań, nie dały spodziewanego obrazu, z ewidentnym obserwowaniem tego efektu za pomocą tzw. lupy (powiększenia ok. $50\times$). Natomiast ustalono, że we wzorach z większą liczbą przepłotów znajduje się więcej tzw. pustek o większych rozmiarach (pęcherzy powietrza zamkniętych pomiędzy wiązkami włókien i między włóknami). Powstają one w wyniku zapowietrzania się żywicy oraz w przypadku dużej liczby przepłotów. Właśnie w przepłotach, w których – zwłaszcza w początkowej fazie nawijania – powstają „kieszenie” żywiczne (rys. 4.21). Na rysunku 6.12 przedstawiono widok przykładowych zgładów wykonanych wzdłuż tworzącej butli, wzorów N_{r1} i N_{r2} . Widoczna wyraźna różnica w zawartości i wielkości pustek oraz żywicy; ilość pustek i ich wielkość oraz udział żywicy są zgodne z uszeregowaniem wzorów przedstawionym na rysunku 6.10.

Przeprowadzono precyzyjne wycinanie próbek, ważenie i wyznaczanie udziałów żywicy i włókna. Ustalono, że największy udział włókna ma wzór N_{r1} , a naj-



Rys. 6.13. Próbkki rurowe: a) szkic próbki, b) schemat wzoru mozaikowego N_r1 , c) próbka wykonana według wzoru N_r1 po zniszczeniu, d) obraz termograficzny próbki wykonanej według wzoru N_r1 w czasie badań zmęczeniowych

mniej w wzory N_r2 , 3 i 5. Dokonano także pomiarów grubości opłotów nośnych butli za pomocą specjalnie skonstruowanego stanowiska pomiarowego, złożonego z dwóch czujników zegarowych oraz wkładanej pomiędzy czujniki wyciętej ścianki kompozytowej kolejnych butli. Stanowisko było usytuowane na tokarce uniwersalnej. W wyniku pomiarów także stwierdzono różnice w grubościach opłotów nośnych struktur nawijanych. Wzory N_r1 były najcieńsze, a struktury N_r2 , 3 i 5 najgrubsze, różnice wynosiły kilka procent. Ma to logiczne uzasadnienie i pokrywa się z obserwacjami i pomiarami przeprowadzonymi wcześniej oraz zostało wyjaśnione na rysunku 4.21. Pomiedzy widokami miejsc zniszczonych ciśnieniowo nie dopatrzono się znaczących korelacji, jedynie miejsce niszczenia wzoru N_r1 znajdowało się na linii zgrupowania przeplotów i linii uskoku w punkcie centralnym, zgodnie z wcześniejszymi badaniami autora.

6.6. Badania zmęczeniowe według SPOSOBU III z wykorzystaniem termowizji

Wykorzystując wcześniejsze doświadczenia autora przedstawione w podrozdziale 5.3, badano próbki rurowe według SPOSOBU III (rys. 5.10) za pomocą pulsatora hydraulicznego i gumy jako medium roboczego (obciążającego). W pierwszej kolejności użyto próbek rurowych o średnicy 40 mm i długości 160 mm z częścią tzw. chwytową, (rys. 6.13a). Jest to standard wewnętrzny, wykorzystywany u naszego partnera naukowego (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden), gdzie autor przebywał na stażu.

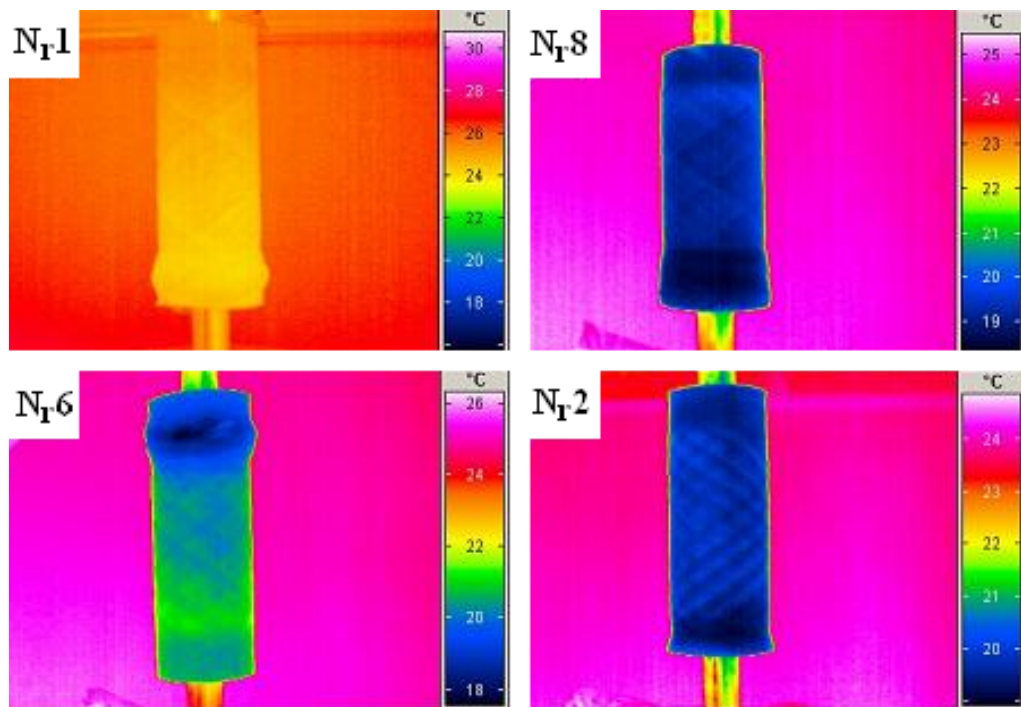
Wykonano badania wstępne polegające na cyklicznym obciążaniu próbek rurowych (rys. 6.13a). Na rysunku 6.13b przedstawiono widok wzoru mozaikowego N_r1 , według którego wykonano próbki rurowe. Na rysunku 6.13c zaprezentowano

próbkę rurową wykonaną według wzoru N_r1 po zniszczeniu w wyniku badań zmęczeniowych. Zniszczenie nastąpiło od punktu centralnego i przebiegało wzdłuż linii uskoków. Na rysunku 6.13d jest obraz termograficzny tej próbki, na którym zaobserwowano skokową zmianę temperatury (różnica ok. $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) właśnie na linii uskoków. Oznacza to, że linie uskoków stanowią rodzaj karbu w próbkach rurowych wykonanych według wzoru N_r1 . Jednak ten efekt obserwowano tylko w rurach wykonanych z trzech warstw, gdy łączna grubość ścianki nie przekraczała $1,5\text{ mm}$. W próbkach grubszych ten efekt zanikał. W próbkach wykonanych według wzoru N_r2 efekt ten nie występował.

W drugiej zasadniczej części badań przeprowadzono nienormowane badania zmęczeniowe części cylindrycznych butli również za pomocą pulsatora hydraulicznego MTS 810 z użyciem gumy jako medium roboczego. Z niezniszczonych części walcowych butli wycinano odcinki rur długości 300 mm , stanowiące części walcowe butli. Do środka wkładano stos dopasowanych krążków gumowych wysokości 210 mm . Za pomocą dwóch tłoków stalowych, włożonych z obu końców wypełnionej gumą rury, ściskano cyklicznie według SPOSOBU III (rys. 5.10). Użytkano częstotliwość 120 cykli na minutę (!), pod obciążeniem w cyklu $150\text{--}250\text{ kN}$. W tych badaniach stosunek długości części pomiarowej do jej średnicy wynosi 2 . Rury uzyskane z części cylindrycznej butli mają średnicę wewnętrzną 111 mm , czyli minimalna długość części badawczej powinna wynosić około 170 mm . Na rysunku 6.5b przedstawiono widok stanowiska badawczego z wykorzystaniem pulsatora hydraulicznego MTS 810 oraz kamery termowizyjnej.

Na rysunku 6.14 przedstawiono zarejestrowane pola temperatur wybranych czterech wzorów mozaikowych (N_r1 , 8, 6 i 2). Obrazy rejestrowano jedynie w pierwszych kilku cyklach obciążenia. Z zarejestrowanych rozkładów temperatury wynikają następujące spostrzeżenia:

- wyższą temperaturę rejestrowano na powierzchni wiązek nawiniętych jako ostatnie we wszystkich próbkach; największe różnice temperatury pomiędzy wiązkami na liniach uskoków próbek z wzorem N_r1 wynoszą około $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- jak wspomniano, największe różnice w zarejestrowanym termicznym obrazie próbek były na liniach uskoków, natomiast na liniach przeplotów nie zaobserwowano takich zmian, podobnie jak w EMWP przedstawionej w następnym punkcie,
- na powierzchni próbek N_r1 wiązki nawinięte jako ostatnie wyznaczają obrys rombów – linie uskoków; próbki następne w szeregu według liczby przeplotów (na rys. 6.14 wykonane wg wzoru N_r8 i N_r6) wykazują podobny efekt, ale już słabiej,
- najbardziej nierównomierne pole temperatur występuje na powierzchni próbek z wzorem N_r2 , w tym wzorze na powierzchni wiązek, oznaczonych jako 4 na rysunku 4.21g (s. 64), rejestrowano wyższą temperaturę o około $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ w porów-



Rys. 6.14. Obrazy termograficzne badanych butli wykonanych według kolejnych wzorów mozaikowych

- naniu z wiązkami oznaczonymi jako 1 i 2 (rys. 4.21g); wiązki oznaczone jako 4 były nawinięte w próbkach z wzorem $N_{r,2}$ jako ostatnie na wierzchu,
- po około trzydziestu cyklach obraz stawał się początkowo niewyraźny, a następnie znikał wraz z zanikiem EA – stawał się jednolity bez względu na zarys wzoru mozaikowego. Oznacza to, że próbka osiągała stan stabilny pracy zmęczeniowej, a pojawiające się uszkodzenia nie miały wpływu na pracę próbki. Dopiero przed samym momentem zniszczenia zmęczeniowego próbki obserwowano nagły wzrost temperatury i bardzo szybkie zniszczenie opłotu nośnego.

Podane spostrzeżenia można wytłumaczyć nieznaczną różnicą w naciągach nawiniętych wiązek. Naciąg w wiązkach nawiniętych jako pierwsze został zmniejszony w wyniku ściśnięcia i poddania się linera oraz wyciśnięcia przez wiązki wierzchnie nadmiaru żywicy w wiązkach dolnych w wyniku jakby ich sprasowania. Wtedy poziom naprężeń w wiązkach górnych i dolnych jest różny, większy w górnych. Po pierwszych kilkudziesięciu cyklach w materiale kompozytowym pomiędzy różnie naprężonymi wiązkami powstają pęknięcia, które powodują ujednorodnienie stanu naprężeń w materiale kompozytowym. Ponieważ tych niejednorodności jest więcej w materiale wykonanym według wzoru $N_{r,2}$, tam też zdefektowanie materiału



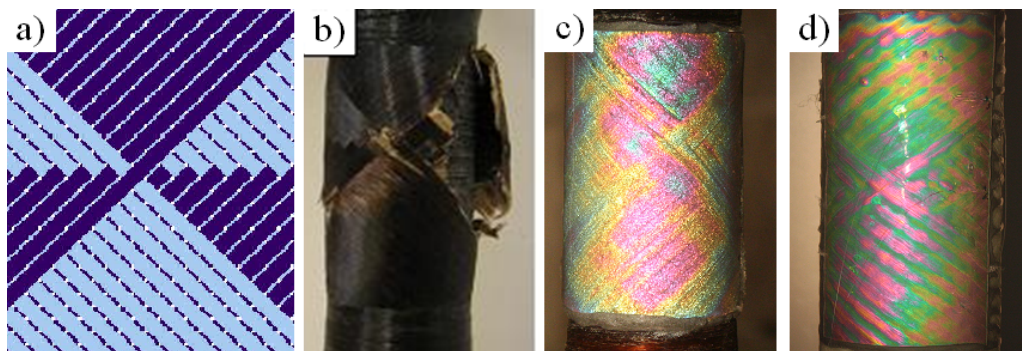
Rys. 6.15. Widok części walcowych butli po badaniach zmęczeniowych z wykorzystaniem pulsatora hydraulicznego

Tabela 6.2. Liczba cykli pod obciążeniem części cylindrycznej butli z amplitudą 150–250 kN i częstością 120 cykli/min; w ostatniej kolumnie – średnia arytmetyczna

Butla	1	2	3	4	5	Średnia
$N_{r,1}$	82 722	128 300	30 103	21 080	14 389	55 318,8
$N_{r,2}$	14 389	18 706	17 157	18 335	29 349	19 567,2
$N_{r,3}$	30 561	19 823	22 149	–	–	24 177,7
$N_{r,4}$	64 330	29 768	35 763	43 882	–	43 435,8
$N_{r,5}$	24 547	27 321	26 395	–	–	26 087,7
$N_{r,6}$	27 984	41 125	39 244	–	–	36 117,7
$N_{r,7}$	20 217	35 763	28 115	32 485	–	29 145,0
$N_{r,8}$	32 224	33 791	49 478	41 962	–	39 363,8

w postaci pęknięć jest największe. Na rysunku 6.15 przedstawiono próbki wycięte z części walcowej zbiorników po przedstawionych badaniach zmęczeniowych. Sposób zniszczenia jest podobny do uzyskanego w badaniach statycznych z użyciem oleju (rys. 6.11).

W tabeli 6.2 zaprezentowano wyniki badań zmęczeniowych – liczba cykli do zniszczenia dla kolejnych próbek oraz ich wartości średnie przedstawione są także na rys. 6.10, s. 112. Podczas interpretacji wyników i wyciąganiu wniosków trzeba pamiętać, że stan obciążenia kompozytowej ścianki nośnej jest inny niż w rzeczywistych zbiornikach walcowych zamkniętych dennicami. Tu występują naprężenia obwodowe, czyli jednoosiowy stan naprężeń. Ten typ badań można



Rys. 6.16. Próbkę rurowe: a) schemat wzoru mozaikowego N_r1 ,
 b) próbka wykonana według wzoru N_r1 po zniszczeniu,
 c) obrazy izochrom zarejestrowane na powierzchni obciążonej próbki
 wykonanej według wzoru N_r1 w czasie badań statycznych,
 d) obrazy izochrom zarejestrowanych na powierzchni obciążonej części walcowej
 butli wykonanej według wzoru N_r1 w czasie badań statycznych

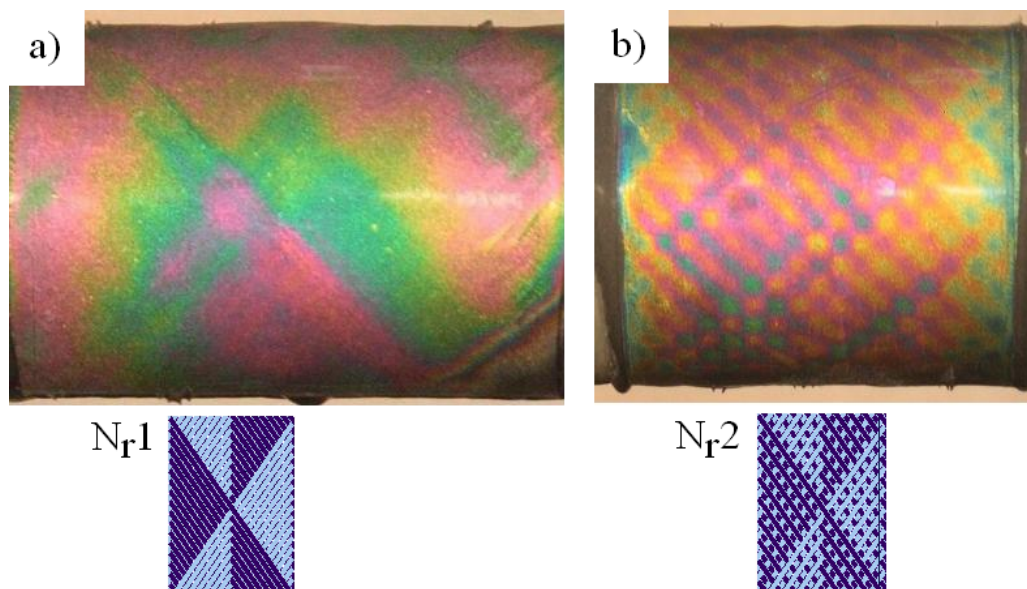
traktować jako badania porównawcze, jednak istotne z perspektywy doboru wzoru mozaikowego nawijania.

Analizując przedstawione w tabeli 6.2 wyniki pomiarów, zauważono, że największą wytrzymałością zmęczeniową charakteryzują się próbki wykonane według wzoru N_r1 , a najmniejszą próbki z wzorem N_r2 oraz że wartości zarejestrowanych wyników są zgodne z wzorami mozaikowymi przedstawionymi w szeregu według przeplotów (rys. 6.10).

6.7. Badania statyczne według SPOSOBU III z użyciem EMWP

Badania ciśnieniowe z użyciem elastooptycznej metody warstwy powierzchniowej (EWMP) prowadzono w dwóch etapach, głównie w celu sprawdzenia przydatności metody do pomiaru odkształceń kompozytowej ścianki nośnej butli. W dostępnej literaturze nie natrafiono na ślad tego typu badań. Pierwszy etap obejmował badania małych próbek rurowych wykonanych według tzw. standardu drezdeńskiego [71]. Przebadano w sumie 8 próbek.

Na rysunku 6.16c zarejestrowane izochromy sygnalizują równomierną pracę wzoru mozaikowego N_r1 w obszarach bez przeplotów. Można zauważyć korelację pomiędzy obrazem termograficznym oraz wzorem próbki i jej zniszczeniem (rys. 6.13). Zniszczenie nastąpiło na liniach uskoków, na których zarejestrowano załamanie izochrom. Na próbkach N_r1 obserwowano równomierny stan odkształceń wewnątrz charakterystycznych trójkątów wyznaczonych przez linie uskoków. Nasuwa to stwierdzenie, że wzory bez przeplotów mogą charakteryzować się



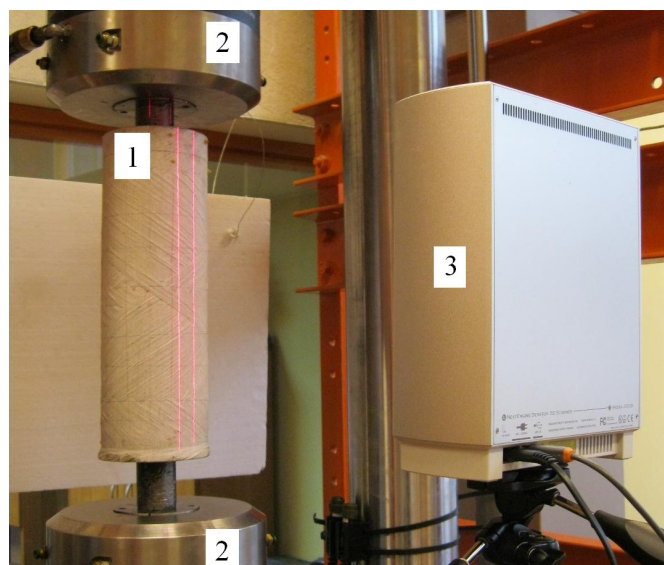
Rys. 6.17. Porównanie izochrom tzw. połówkowych, zarejestrowanych na powierzchni butli, wykonanych według wzorów N_r1 i N_r2

jednolitym stanem odkształcenia, czyli równomiernym w porównaniu z próbkami wykonywanymi tradycyjną metodą nawijania według np. wzorów N_r2 . Na rysunku 6.16d przedstawiono widok izochrom zarejestrowanych na powierzchni obciążonej części walcowej butli. Oznacza to, że linie uskoków stanowią rodzaj karbu w próbkach rurowych wykonanych według wzoru N_r1 . Jednak ten efekt wyraźnie obserwowano w rurach wykonanych z trzech warstw, a łączna grubość ścianki nie przekraczała 1,5 mm. W próbkach grubszych ten efekt był słabszy. W próbkach wykonanych według wzoru N_r2 efekt ten nie występował. Tu zachodzi taka sama równomierność odkształceń jak w próbkach cieńszych i grubszych badanych zmęczeniowo.

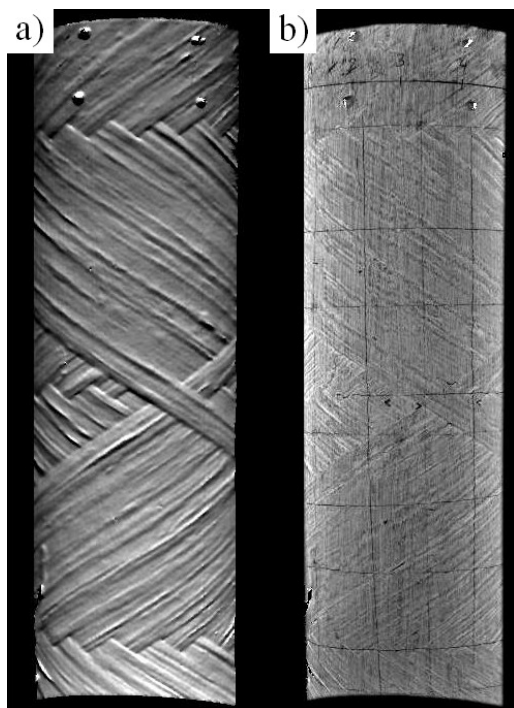
Na rysunku 6.17 przedstawiono porównanie izochrom wzorów N_r1 i N_r2 . Można zaobserwować większą nierównomierność odkształceń wzoru N_r2 . Sugeruje to tendencję do powstawania licznych pęknięć we wzorze N_r2 w wyniku nierównomierności odkształceń/naprężeń lokalnych. Obraz zarejestrowanych izochrom świadczy o braku przemieszczeń na liniach zgrupowania przepłotów, podobnie jak na obrazie termograficznym (rys. 6.14).

6.8. Pomiary przemieszczeń powierzchni butli z wzorem mozaikowym za pomocą skanera światła strukturalnego

Wyniki tych prac w szerszym zakresie opublikowano w [140]. Podobnie jak w poprzednim punkcie, przeprowadzono obciążanie części cylindrycznej zbiornika od wewnątrz za pomocą gumy jako medium roboczego (rys. 6.18). Na tak przygotowanym stanowisku wykonano pomiary powierzchni zbiornika w dwóch stanach obciążenia: 0,1 kN oraz 240 kN. Pomiary wykonano za pomocą skanera światła strukturalnego NextEngine HD o maksymalnej dokładności 0,12 mm i maksymalnej gęstości próbkowania 0,06 mm. Dla pierwszych testów dokładność przestrzenną skanowania ustawiono na 0,375 mm, a gęstość próbkowania na 0,25 mm. Jednocześnie, za pomocą kamery wbudowanej w skaner, rejestrowano cyfrowe zdjęcia powierzchni próbki. W celu uniknięcia błędów pomiarowych związanych z cylindrycznym kształtem zbiornika pomiary prowadzono w trzech pozycjach skanera – frontальной i dwóch skośnych, tak aby kąt padania wiązki światła strukturalnego na obiekt nie był mniejszy niż 45° . Dla każdego stanu obciążenia wykonano więc po trzy skanowania. Scalenie częściowych skanów do wspólnego układu przestrzennego odbyło się półautomatycznie za pomocą oprogramowania sterującego pracą skanera. Wymagało to przybliżonego wskazania charakterystycznych, wspólnych punktów na częściowych skanach służących wstępnej orientacji. Dalej proces przebiegał już automatycznie, a błąd scalania

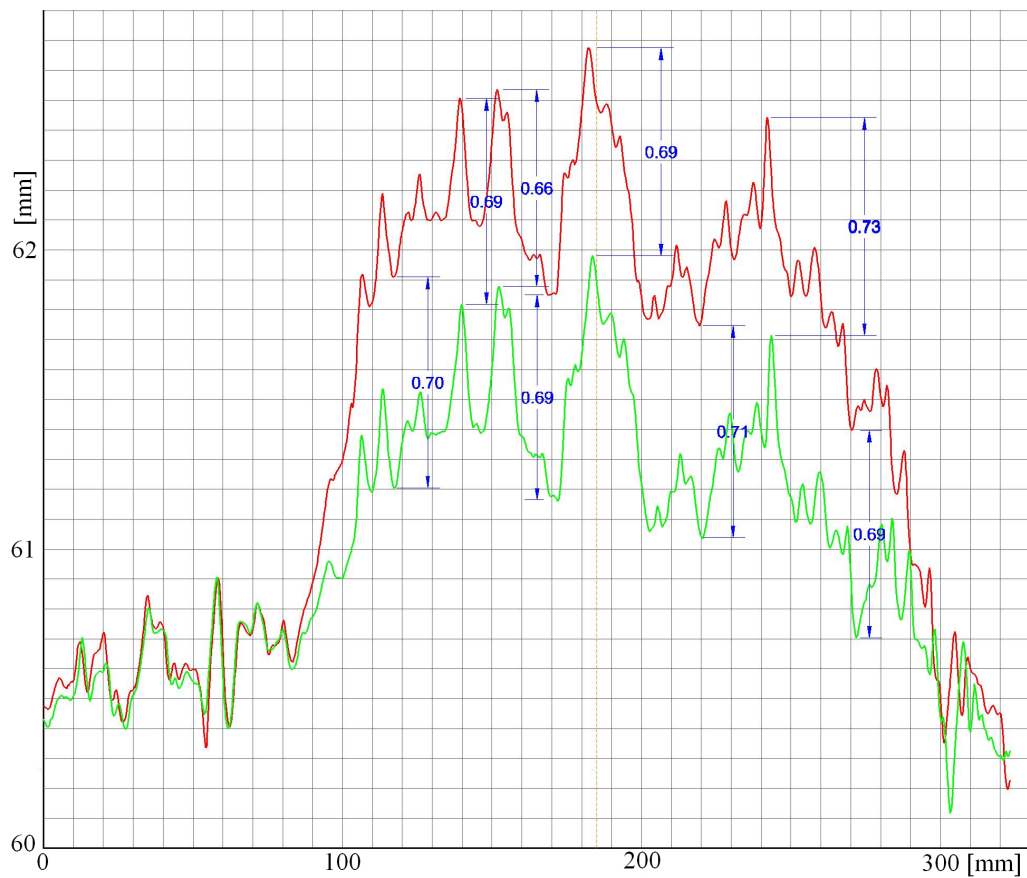


Rys. 6.18. Widok stanowiska badawczego: 1 – próbka, część cylindryczna butli,
2 – uchwyty maszyny wytrzymałościowej MTS 810,
3 – skaner światła strukturalnego NextEngine HD

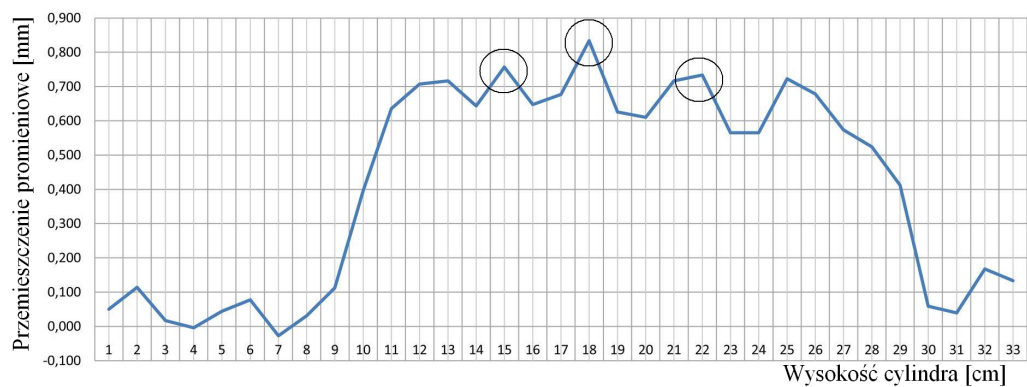


Rys. 6.19. Model siatkowy bez tekstury (a) i teksturowany (b)

RMS nie przekraczał 0,025 mm. W efekcie uzyskano siatkowe modele powierzchni butli w obu stanach obciążenia. Dzięki równoległej rejestracji obrazu RGB modele siatkowe można było przedstawiać zarówno w wersji teksturowanej, jak i pozbawionej tekstur (rys. 6.19). Umożliwiało to łatwiejszą identyfikację charakterystycznych punktów wzoru mozaikowego. Oprogramowanie sterujące skanerem ułatwiało też wygenerowanie przekrojów przez powierzchnię badanego cylindra w obu stanach obciążenia. Z kilku dostępnych opcji wybrano przekroje radialne odpowiadające w przybliżeniu tworzącym walca. Linie przekrojowe wyeksportowano do programu CAD (Bentley MicroStation), w którym opracowano wykres obrazujący odkształcenia na arbitralnie wybranej tworzącej walca (rys. 6.20). Eksport współrzędnych do pliku TXT, a następnie wczytanie ich do programu Excel umożliwiły wykonanie dodatkowego wykresu przemieszczenia promieniowego na całej wysokości cylindra (rys. 6.21). Badania z wykorzystaniem zastosowanej metody umożliwiają pomiar nierówności powierzchni, topografii powierzchni nawijanej, w celu np. identyfikacji wzoru mozaikowego i jego parametrów takich, jak: kąt nawijania, szerokość wiązki, profil wiązki, określenie dokładności wykonania itp. Dzięki zastosowaniu przedstawionej metody udało się wykazać, że oplót kompozytowy wykonany metodą nawijania odkształca się nierównomiernie (rys. 6.21). Wiązki nawinięte



Rys. 6.20. Odkształcenia na wybranej tworzącej walca w obu stanach obciążenia



Rys. 6.21. Przesunięcie promieniowe na całej wysokości cylindra

jako pierwsze (widoczne częściowo na powierzchni opłotu, ponieważ na pewnych odcinkach są nieprzykryte wiązkami nawijanymi po nich) odkształcają się mniej, do około 0,2 mm (odkształcenie promieniowe – rys. 6.21), od wiązek nawiniętych jako ostatnie. W opisanych powyżej badaniach uzyskano przemieszczenia promieniowe do około 1 mm (rys. 6.21). Oznacza to różnicę w lokalnych przemieszczeniach na powierzchni zbiornika rzędu 20%.

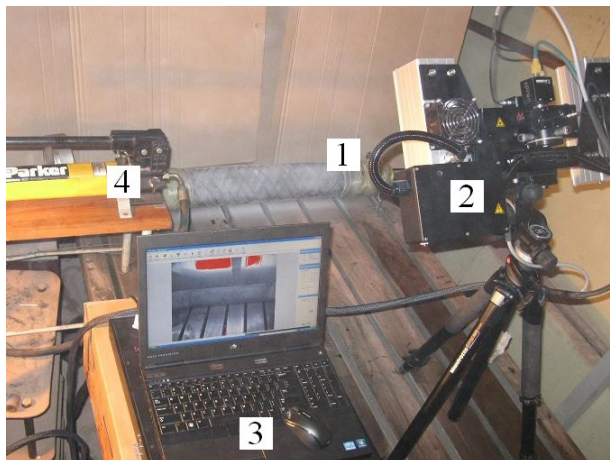
Z rysunków 6.20 i 6.21 wynika, że obciążeniu poddany był cylinder na długości około 280–300 mm, ponieważ poza tym przedziałem nie rejestrowano odkształceń. Jest to przedział, w którym znajdowała się ściśnięta guma pomiędzy denkami tłoków. Natomiast wewnątrz tego przedziału można zaobserwować 3 piki (zaznaczone okręgami na rys. 6.21), które odpowiadają występowaniu większych lokalnych odkształceń na tworzącej umiejscowionej w okolicach lewej krawędzi (rys. 6.19a). Piki zewnętrzne związane są ze skokową zmianą odkształcenia na wysokości denek tłoka. Natomiast trzy środkowe piki pochodzące od linii uskoków (skrajne) i od linii przepłotów (środkowy).

Przedstawiona metoda umożliwia także łączenie uzyskanych wyników z innymi metodami, np. termowizją lub EMWP, czego jednak nie wykonano w tej pracy. Wskazane jest użycie skanera o większej czułości lub badanie próbek z cieńszą ścianką materiału kompozytowego, w której odkształcenia są większe na liniach uskoków.

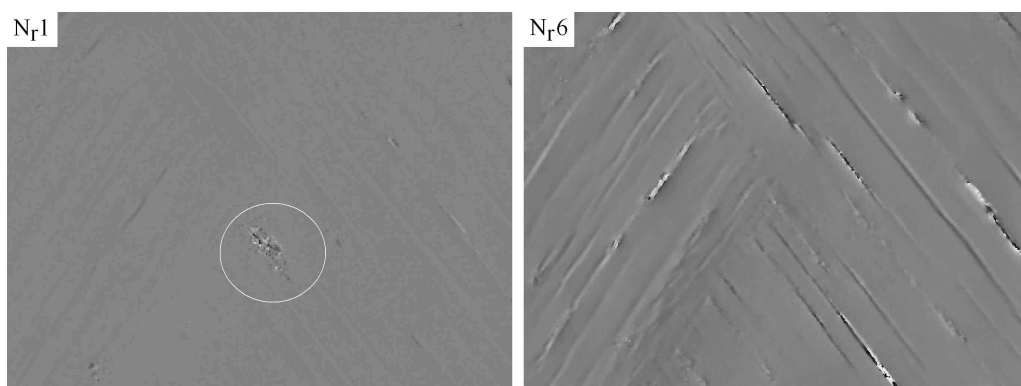
6.9. Badania statyczne butli z użyciem szerografii

Przedstawione wyniki badań zaprezentowano szerzej w pracy [82], a samą metodę scharakteryzowano w punkcie 5.1. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 6.22. Badane zbiorniki – 1, mocowano jednostronnie z użyciem specjalnych uchwytów do stołu pomiarowego, podobnie jak w badaniach metodą interferometrycznych obrazów plamkowych. Stół pomiarowy to żeliwna konstrukcja odizolowana od podłoża przez specjalne tłumiki drgań. Obiekt badany – zbiornik kompozytowy pokryty matowym, jasnym lakierem, aby uniknąć tzw. efektu lustra. Badany zbiornik był połączony za pomocą elastycznego przewodu wysokociśnieniowego z ręczną pompą oleju – 4. W czasie badań rejestrowano stany powierzchni zbiornika przy ciśnieniu zerowym oraz 100 barów.

Na rysunku 6.23 przedstawiono dwa wybrane obrazy badanych zbiorników. We wzorze $N_{r,6}$ można zauważyć powierzchniowe wady powstałe podczas procesu nawijania, a mianowicie nadmierną lokalną ilość żywicy pomiędzy wiązkami. Dzięki szerografii w czasie obciążania ciśnieniem do 100 bar zaobserwowano lokalne różnice odkształceń na styku nawiniętych wiązek. Wzór $N_{r,1}$ wskazuje lokalny defekt struktury występujący w miejscu skrzyżowania linii uskoków w punkcie centralnym – zaznaczono okręgiem (por. z rys. 4.23). Powstały defekt jest również



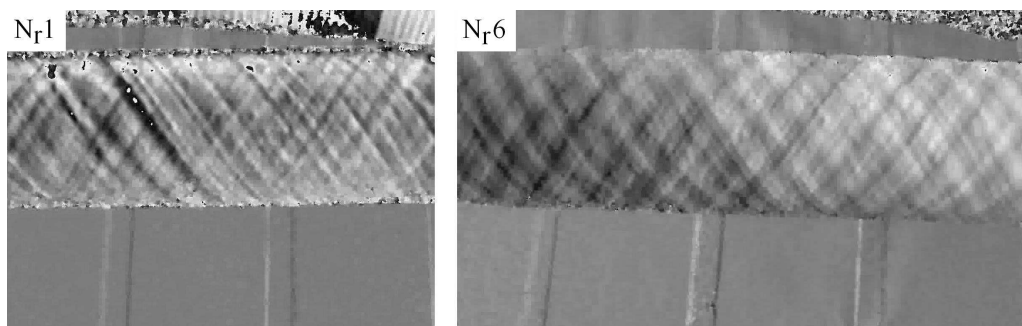
Rys. 6.22. Widok stanowiska badawczego do lokalizacji wad w materiałach kompozytowych za pomocą metody szerografii: 1 – badana butla, 2 – głowica pomiarowa, 3 – komputer rejestrujący, 4 – pompa wysokociśnieniowa



Rys. 6.23. Charakterystyczne obszary zarejestrowane za pomocą metody szerografii na powierzchni zbiorników wykonanych według wzorów mozaikowych N_r1 i N_r6

związany z lokalnym większym udziałem żywicy oraz powstałych pustek, które występują przy metodzie nawijania.

Zbiornik wykonany według wzoru N_r6 (rys. 6.23) zawiera więcej przeplotów w porównaniu ze wzorem N_r1 . We wzorze N_r6 ujawniają się liczne wady związane z nadmiernym udziałem żywicy z pęcherzami powietrza pomiędzy równoległymi wiązkami w obszarach bez przeplotów. We wzorze N_r1 obszary bez przeplotów są odpowiednio większe, ale nie zauważono w nich takich wad. Jedynie w punkcie centralnym zaznaczonym okręgiem wykryto obszar ze zwiększonym udziałem



Rys. 6.24. Obraz powierzchni zbiornika uzyskany podczas badania zbiornika ze wzorem mozaikowym N_r1 i N_r6 . Widoczne znaczne nierównomierności we wzorze N_r6 w porównaniu z N_r1

żywicy i pęcherzy powietrza. Poza tym powierzchnia butli jest równomierna bez wyraźnych wad w porównaniu z butlą ze wzorem N_r6 .

Porównując obrazy przedstawione na rysunku 6.24, można także zauważyć różnice w jakości wykonanych pomiarów. Obraz z wzorem N_r6 jest znacznie lepszej jakości. Może to być wynikiem różnych czynników, np. wpływu nieznacznej zmiany temperatury w pomieszczeniu. Efekt ten jest widoczny w górnych częściach obrazów pokazujących tło – obszar za badanymi zbiornikami, czyli obraz ze wzorem N_r6 jakościowo wyszedł w pomiarach znacznie lepiej niż N_r1 .

Nawijane struktury kompozytowe wykonane według wzoru mozaikowego N_r1 charakteryzują się mniejszą liczbą wad wynikających z liczby przeplotów. Tego nie udało się lepiej uchwycić w użytych ciśnieniach. Prawdopodobnie większe ciśnienia w czasie badań powinny umożliwić lepsze wychwycenie tego efektu. Za pomocą przedstawionej metody nie zarejestrowano defektów, zmiany odkształceń wynikających z występowania linii przeplotów i uskoków. Znalezione natomiast wady wynikające z procesu technologicznego nawijania według wzorów N_r1 i N_r6 . Przedstawiona metoda jest bardzo szybka i prosta w użyciu. Wyniki skanowania otrzymywane są na bieżąco, niewymagane jest dodatkowe przygotowywanie próbek badawczych. W IMiMT po raz pierwszy testowano możliwości metody szerografii, do której wyposażenie wypożyczono z firmy EC TEST SYSTEMS z Krakowa. Metoda, zdaniem autora, jest obiecująca i wymaga udoskonalenia.

6.10. Zaproponowane modele obliczeniowe – podstawowe problemy

Metody modelowania właściwości mechanicznych, stosowane powszechnie w odniesieniu do konwencjonalnych materiałów kompozytowych są nieprzydatne w zastosowaniu do kompozytów wzmacnianych włóknami. Decydujący wpływ na właściwości ma struktura materiału kompozytowego, a w niej sposób ułożenia włókien (np. we

wzorach mozaikowych) oraz ich współpraca z osnową. Modelowanie jest także drogą do znacznego zredukowania czasu trwania prac eksperymentalnych a w ostatecznym zestawieniu znacznego obniżenia kosztów konstrukcji kompozytowych. Dlatego też modelowanie właściwości materiałów o złożonej wewnętrznej strukturze jest bardzo aktualnym zagadnieniem poznawczym i aplikacyjnym.

W pracy [28] autor zaproponował prosty i skuteczny sposób wyznaczania nośności kompozytowych butli nawijanych, oparty na ilościowym udziale włókien w osnowie i kącie nawijania. Jednak sposób ten, jak i wiele innych wykorzystujących np. klasyczną teorię laminatów, czy gotowe modele MES oprogramowania komercyjnego, nie rozróżnia liczby przeplotów w materiale. W podrozdziale 5.2 przedstawiono literaturowe przykłady modelowania materiałów kompozytowych wytwarzanych metodą nawijania, w których wzmocnienie włókniste jest ułożone według wzorów mozaikowych. Wszystkie te przykłady modelowania charakteryzują się podziałem struktury wzmocnienia według wzoru mozaikowego na komórki z różnym ułożeniem włókien, a następnie scaleniu komórek w warstwy według różnych pomysłów. Autorzy wymienionych prac próbują odnieść wyniki przeprowadzonych symulacji do wyników badań eksperymentalnych, jednak budzą one wiele zastrzeżeń, co szczegółowo skomentowano we wspomnianym podrozdziale 5.2.

Zagadnienie modelowania nie było przedmiotem badań w niniejszej monografii. Ze względu na aktualność tematyki modelowania i pokładane w niej nadzieje uznano za celowe poruszenie wybranych zagadnień z tego obszaru. Zagadnienie modelowania jest jednak złożone, co starano się udokumentować poniżej, jest także przedmiotem badań zespołu, z którego wywodzi się autor. Należy także podkreślić, iż różne aspekty modelowania zbiorników kompozytowych są aktualnie przedmiotem badań renomowanych producentów i ważnym celem w licznych projektach międzynarodowych (np. StorHy, HyComp, InGas, HyCube, Copernik), w których bierze udział Zakład Mechaniki Ośrodków Ciągłych, w tym i autor monografii. W dalszej części pracy omówiono zwięźle głównie te zagadnienia, które są podejmowane przy udziale Zakładu w ramach naukowych konsorcjów.

Za szczególnie przydatną metodę modelowania można uznać metodę homogenizacji (metodę uśredniania parametrów mikroskopowych i mezoskopowych), która jest alternatywnym sposobem modelowania konstrukcji z uwzględnieniem ułożenia włókien w materiale kompozytowym, np. według wzorów mozaikowych (chodzi o uwzględnienie w modelach charakterystycznych miejsc ułożenia przeplotów i obszarów bez przeplotów przedstawionych na rys. 4.22, s. 65). Opisane dalej metody homogenizacji pozwalają na obliczenia wytrzymałościowe i projektowanie elementów wykonanych z materiału kompozytowego wzmocnionego włóknem ciągłym. Jednak w ujęciu praktycznym (inżynierskim) równie ważne jest przewidywanie żywotności elementów i rozwoju pęknięć, uszkodzeń materiału. Założono, że wytrzymałość kompozytu zależy przede wszystkim od wzmocnienia, czyli włókien. Dlatego modelując i symulując proces wzrostu uszkodzeń materiału

skoncentrowano się na procesie zrywania włókien. Ośrodek ciągły opisywany jest w tym przypadku w języku tzw. automatów komórkowych. Badany kompozyt, wzmocniony włóknami, jest traktowany wówczas jako złożony z kilku różnych typów automatów. Każdy fragment materiału modelowany jest abstrakcyjnym matematycznym elementem, z odpowiednimi stopniami swobody, reprezentowanymi z kolei przez wielkości fizyczne związane z indywidualnym automatem. Zamiast równań różniczkowych cząstkowych (mechanika ośrodków ciągłych), rozwiązuje się równania mechaniki stochastycznej, opisujące dynamikę poszczególnych automatów. Postać równań dynamiki zależy od przyjętego i zastosowanego automatu. Kluczowe znaczenie ma przy tym oddziaływanie pomiędzy sąsiadującymi automatami lub tzw. długozasięgowe siły oddziaływania. W rzeczywistym kompozycie nie ma możliwości ciągłego obserwowania rosnących defektów. Dlatego równolegle do symulacji procesu zrywania skonstruowano oprogramowanie symulujące pojawianie się efektów emisji akustycznej [35, 37, 90]. Modelowanie kumulacji uszkodzeń w zbiornikach wymaga dalszych prac. Szczególnie obiecujące są procedury z zastosowaniem wspomnianych automatów komórkowych i geometrii fraktalnej.

Metody homogenizacji

Założono, że modelowanie długowłóknistych materiałów kompozytowych polega na wyznaczeniu równań konstytutywnych w skali makroskopowej na podstawie znajomości właściwości materiałowych poszczególnych faz tworzących materiał kompozytowy oraz wzorów ułożenia włókien (przejście ze skali mikro do mezo, a następnie makro). Znajomość właściwości kompozytu w skali makroskopowej jest bowiem kluczowa w zastosowaniach inżynierskich. W metodach homogenizacji wykorzystuje się bardziej lub mniej dokładne modelowanie mikrostruktury kompozytów, dlatego też nazywane są często w literaturze modelami mikromechanicznymi. Wyznaczanie parametrów materiałowych (np. moduł Younga, współczynnik Poissona, współczynnik rozszerzalności cieplnej) przeprowadza się poprzez odpowiednie uśrednianie względem wybranej reprezentatywnej objętości. W skali makro struktura kompozytu nie jest „namacalna”, ale jest znana zależność między naprężeniem i odkształceniem wynikająca jednak z właściwości faz i ułożenia włókien.

Modele mikromechaniczne możemy podzielić, ze względu na stosowane metody, na trzy zasadnicze grupy: empiryczne, analityczne i numeryczne. Na szczególną uwagę zasługują modele analityczne, gdyż pozwalają one na szybkie obliczenia i nie wymagają przeprowadzenia dużej liczby eksperymentów w celu kalibracji, jak na przykład w modelach empirycznych. Fundamentem większości analitycznych metod homogenizacji jest „ekwiwalentna metoda odkształcenia własnego” [106, 107], która opisuje pojedyncze eliptyczne wtrącenie w sprężystej osnowie. Dlatego też to podejście nadaje się dobrze do opisu kompozytów wzmocnianych włóknami. Na uwzględnienie interakcji między wtrąceniami pozwala metoda Mori–Tanaki [118, 158], której podstawą jest rozwiązanie przedstawione przez

Eshelby'iego [106, 107]. Inną, równie często używaną, metodą homogenizacji jest metoda „samo uzgadniającego się pola”, która uwzględnia losowo rozmieszczone wtrącenia w nieskończenie wielkiej osnowie. Metoda ta jednak wymaga iteracyjnego rozwiązywania, co znacząco wydłuża czas obliczeń.

Nie zawsze jednak modele analityczne dają zadowalające przybliżenie właściwości materiałowych kompozytu, szczególnie w przypadku skomplikowanej struktury ułożenia włókien, ponieważ przyjęte założenia nie uwzględniają istotnych elementów takiej struktury. W tej sytuacji zazwyczaj stosuje się numeryczne modele mikromechaniczne, które także nie wymagają przeprowadzenia wielu eksperymentów w celu ich kalibracji. Numeryczne modele mikromechaniczne wykorzystują głównie MES [150, 199], co pozwala na zastosowanie komercyjnych programów obliczeniowych. Ponadto numeryczne metody homogenizacji umożliwiają w bardzo łatwy sposób uwzględnienie różnego rodzaju nieliniowości (np. materiałowych). Przykładem jest nieliniowa analiza mikromechaniczna MES dla zadanych ścieżek obciążenia kompozytów o osnowie metalicznej [192].

W przypadku kompozytów wzmocnionych tkaniną oraz z pewnym uogólnieniem kompozytów nawijanych (zwłaszcza wzór mozaikowy N_r2), szczególnie przydatne są metody zakładające periodyczność struktury. Takie kompozyty mogą być opisane za pomocą metody Eshelby'iego [106, 107] rozszerzonej o uwzględnienie cyklicznych warunków brzegowych. Oznacza to, że przemieszczeniowe warunki brzegowe mogą być rozwijane w szereg Fouriera.

Reprezentatywna komórka objętościowa RVE

Jednym z fundamentalnych założeń mikromechaniki jest podział kontinuum mechanicznego na kilka poziomów hierarchii (kilka skal długości). Oznacza to przykładowo, że kontinuum takie może być podzielone na makroelementy i mikroelementy. Na poziomie makro kontinuum zbudowane jest z dużej liczby punktów materialnych, a każdy z tych punktów odnosi się do poziomu mikro (mikroprzestrzeni), zawierającego dużą liczbę mikroelementów (mikrokontinuum). Jeśli taki materiał jest statystycznie jednorodny na poziomie makro, to żeby wyznaczyć jego parametry mechaniczne, należy je zbadać w dowolnym punkcie materiału na poziomie makro. Mikrokontinuum, do którego odnosi się ten punkt, jest „reprezentatywną komórką objętościową” RVE (ang. *RVE Representative Volume Element*), rys. 6.25.

Skale długości, związane z poziomem makro i mikro są relatywne. W przypadku, gdy badamy niejednorodny metal, skala mikro utożsamiana jest z długością na poziomie od nm do μm , a skala makro z długością na poziomie od mm do cm. Natomiast w przypadku obliczeń sztywności dużego obiektu hydrotechnicznego, np. tamy – skala mikro może być na poziomie centymetrów, a skala makro, metrów. W każdym przypadku ważne jest, aby tak wybrać wielkości komórki reprezentatywnej, by zawierała dostatecznie dużą liczbę mikroelementów, co z kolei powoduje, że statystycznie reprezentuje lokalne właściwości kontinuum.

W klasycznej mikromechanice zakłada się, że właściwości materiałowe na poziomie makro są zawsze jednorodne, lecz nieznanne. Natomiast na poziomie mikro (wewnątrz RVE) niejednorodne, ale znane. Zadaniem zatem metod mikromechaniki jest wyznaczenie właściwości materiałowych na poziomie makro, tzw. „efektywne właściwości materiałowe”. Efektywne właściwości materiałowe łączą uśrednione naprężenie w RVE z uśrednionym odkształceniem, czyli

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{ij} &= \bar{C}_{ijkl} \bar{\varepsilon}_{kl} \\ \bar{\sigma}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \\ \bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV\end{aligned}\tag{6.1}$$

gdzie $\bar{C}_{ijkl}$ jest macierzą sprężystości.

W przypadku kompozytów wzmocnionych według wzorów mozaikowych można zastosować dwustopniową homogenizację, podobnie jak dla tkanin. Pierwszy etap homogenizacji służy do wyznaczenia właściwości mechanicznych wiązki materiału kompozytowego z jednokierunkowo ułożonymi włóknami. W drugim etapie, gdy znane są już efektywne właściwości materiałowe wiązki, można wyodrębnić następną komórkę reprezentatywną opisującą wzór mozaikowy, czyli charakterystyczne elementy geometrii wzoru przedstawione na rys. 4.22 i 4.23. W tym przypadku jest to zastosowanie zarówno homogenizacji analitycznej (etap pierwszy), jak i numerycznej (etap drugi).

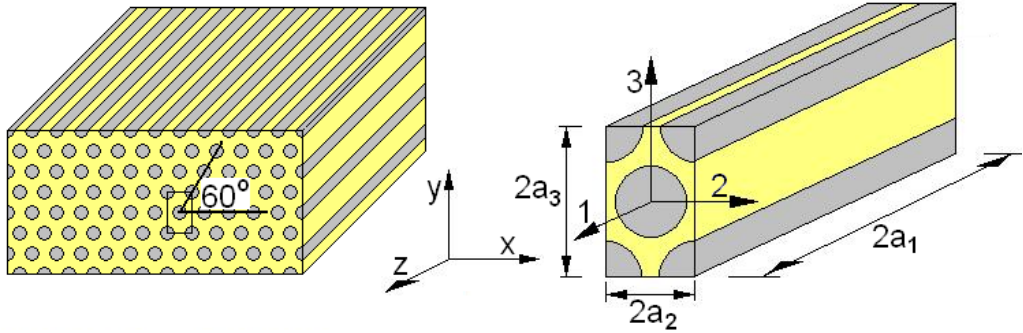
Homogenizacja analityczna

Pierwszy etap homogenizacji ma na celu wyznaczenie efektywnych właściwości materiałowych kompozytu wzmocnionego włóknami jednokierunkowymi (wiązki włókien). W prezentowanym przykładzie włókna mają przekrój kołowy i rozmieszczone są w osnowie w sposób heksagonalny – rys. 6.25, co najbardziej odpowiada rozmieszczeniu włókien w rzeczywistych materiałach wzmocnionych włóknami ciągłymi. Znanne są także właściwości materiałowe, parametry sprężystości poszczególnych faz materiału.

Przedstawiona metoda homogenizacji wykorzystuje rozwiązanie Eshelby’iego [106, 107] rozszerzonym o uwzględnienie cyklicznych warunków brzegowych. Zgodnie z tym podejściem, efektywny tensor sprężystości ma postać:

$$\bar{C} = C^m - V_f \left[\left(C^m - C^f \right)^{-1} - \mathbf{P} \right]^{-1}\tag{6.2}$$

$\mathbf{P}$ – tensor opisujący geometrię wtrącenia,
 V_f – objętościowy udział włókien w kompozycie,
 C^m – tensor sprężystości osnowy (izotropowy),
 C^f – tensor sprężystości włókna (izotropowy).



Rys. 6.25. Materiał kompozytowy wzmocniony w jednym kierunku włóknem ciągłym o przekroju kołowym w układzie heksagonalnym oraz wyodrębniona komórka reprezentatywna RVE

W przypadku heksagonalnego rozłożenia włókien w osnowie można założyć, że efektywny tensor sprężystości kompozytu jest transversalnie izotropowy i może być zapisany w postaci macierzowej:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Stąd możemy wyznaczyć efektywne parametry sprężyste dla kompozytu:

$$\begin{aligned} E_1 &= C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} \\ E_2 = E_3 &= \frac{(2C_{11}C_{22} - 2C_{11}C_{23} - 4C_{12}^2)(C_{22} - C_{23} + 2C_{44})}{3C_{11}C_{22} + C_{11}C_{23} + 3C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2} \\ G_{12} = G_{13} &= C_{66} \\ \nu_{12} = \nu_{13} &= \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}} \\ \nu_{23} &= \frac{C_{11}C_{22} + 3C_{11}C_{23} - 2C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2}{3C_{11}C_{22} + C_{11}C_{23} - 2C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Homogenizacja numeryczna

Homogenizacja numeryczna, podobnie jak analityczna, ma na celu wyznaczenie efektywnych parametrów sprężystych dla materiału niejednorodnego, na podstawie wiedzy o właściwościach faz tworzących ten materiał oraz ich geometrii elementów wzoru. Podobnie jak w przypadku homogenizacji analitycznej wykorzystuje się

tu koncepcję komórki reprezentatywnej RVE oraz przyjmuje się założenie, że materiał jest statystycznie jednorodny na poziomie makro. Homogenizacja numeryczna może być wykorzystywana zarówno w przypadku materiałów o losowo rozmieszczonych wtrąceniach, jak i w przypadku materiałów z usystematyzowaną strukturą wewnętrzną. W przypadku homogenizacji wielostopniowej homogenizacja numeryczna może być wykorzystana zarówno na poziomie mikro, np. do wyznaczania parametrów wiązki, jak i na poziomie mezo do wyznaczania parametrów przepływów. W homogenizacji numerycznej najczęściej wykorzystuje się MES. Zastosowanie MES do modelowania RVE pozwala na uwzględnienie skomplikowanych kształtów geometrycznych wtrąceń oraz umożliwia modelowanie wtrąceń o nieizotropowych właściwościach materiałowych. Ma to szczególne znaczenie podczas modelowania kompozytów wzmacnianych wiązkami włókien, kiedy niezbędne jest uwzględnienie skomplikowanej geometrii wzoru, a w niej przepływów zawierających wtrącenia w postaci kieszeni żywicznych z większym udziałem pustek powietrznych – rys. 6.10.

W przypadku homogenizacji numerycznej, kluczowe znaczenie ma takie zastosowanie cyklicznych warunków brzegowych, aby w RVE pole odkształcenia było stałe, czyli pole odkształcenia musimy otrzymać dla sześciu niezależnych składowych tensora odkształcenia, przez zastosowanie odpowiednich przemieszczeniowych warunków brzegowych dla RVE, co w konsekwencji prowadzi do rozwiązania sześciu niezależnych zagadnień brzegowych.

$$\begin{array}{ll}
 \bar{\varepsilon}_1 = 1 & \bar{\varepsilon}_2 = \bar{\varepsilon}_3 = \bar{\varepsilon}_4 = \bar{\varepsilon}_5 = \bar{\varepsilon}_6 = 0 \\
 \bar{\varepsilon}_2 = 1 & \bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_3 = \bar{\varepsilon}_4 = \bar{\varepsilon}_5 = \bar{\varepsilon}_6 = 0 \\
 \vdots & \vdots
 \end{array} \tag{6.5}$$

Postępując w ten sposób można wyznaczyć składowe macierzy sprężystości w pierwszej kolumnie. Składowe te wyznaczane są przez obliczenie średniego naprężenia w RVE przy zadanym jednostkowym odkształceniu.

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{11} dV \\
 C_{12} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{12} dV \\
 C_{13} &= \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{13} dV
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Stosując dalej tę samą procedurę można wyznaczyć wszystkie składowe tensora sprężystości, w kolejności jedna kolumna macierzy za drugą. Podobnie jak

w homogenizacji analitycznej, otrzymuje się macierz sprężystości materiału kompozytowego rozumianego jako ośrodek jednorodny:

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_3 \\ \bar{\sigma}_4 \\ \bar{\sigma}_5 \\ \bar{\sigma}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\epsilon}_1 \\ \bar{\epsilon}_2 \\ \bar{\epsilon}_3 \\ \bar{\epsilon}_4 \\ \bar{\epsilon}_5 \\ \bar{\epsilon}_6 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Na tej podstawie wyznaczamy znane nam parametry sprężyste:

$$\begin{aligned} E_1 &= C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} \\ E_2 &= E_3 = \frac{(C_{11}(C_{22} + C_{23}) - 2C_{12}^2)(C_{22} - C_{23})}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2} \\ G_{12} &= G_{13} = C_{66} \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}} \\ \nu_{23} &= \frac{C_{11}C_{23} - C_{12}^2}{C_{11}C_{22} - 2C_{12}^2} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Schemat mechanizmu homogenizacji wielostopniowej dla oplotu zbiornika ciśnieniowego przedstawiono na rys. 6.26 [86].

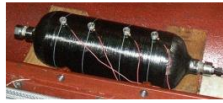
Symulacje MES

Podjęto próbę przeprowadzenia symulacji numerycznych MES zarówno w zakresie liniowym, jak i nieliniowym (uwzględniając odkształcenia plastyczne linera stalowego). Analiza miała na celu określenie wartości ciśnienia krytycznego powodującego zniszczenie oplotu kompozytowego. Na rysunku 6.27 przedstawiono przykład modelu obliczeniowego z uwzględnieniem warstw oplotu ułożonego pod różnym kątem.

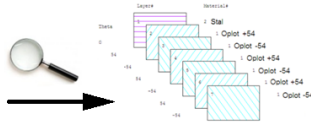
Model obliczeniowy części walcowej butli kompozytowej wykonany został w systemie Ansys. Do dyskretyzacji modelu zastosowane zostały elementy Shell 208, które umożliwiają modelowanie struktur warstwowych z warstwami ułożonymi pod różnymi kątami względem siebie. Na obecnym etapie modelowana była tylko część walcowa butli. Parametry geometryczne tej części są następujące:

- oplot wykonany z włókna szklanego, 3 warstwy,
- jedna warstwa zawierająca 17 wiązek pod kątem $+54^\circ$ oraz 17 pod kątem -54° ,
- jedna wiązka zawiera 5 rowingów tex 2400 g/km,
- grubość oplotu około 4,3 mm,
- średnica zewnętrzna linera 114 mm,
- liner spawany z blachy miękkiej grubości 1,25 mm.

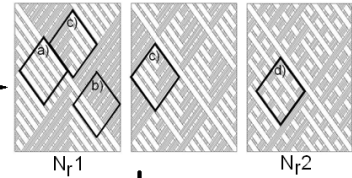
Butlia kompozytowa



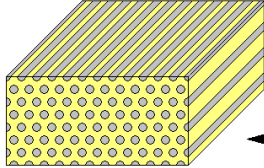
Układ warstw w butli



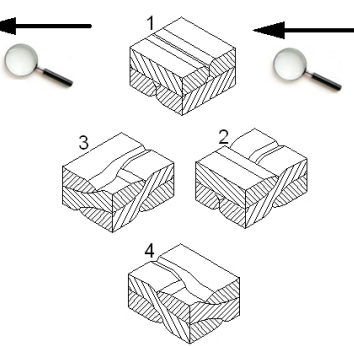
Warstwy z wiązkami ułożonymi według wzorów mozaikowych



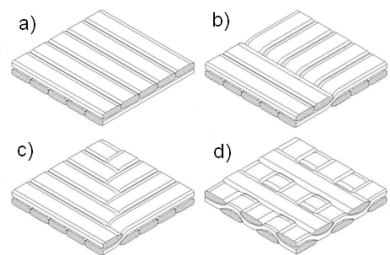
Wiązka włókien oplotu



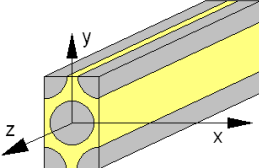
Cztery komórki REV potrzebne do ułożenia każdego wzoru mozaikowego



Charakterystyczne obszary wzorów mozaikowych



Najmniejsza komórka REV



Rys. 6.26. Schemat ideowy mechanizmu homogenizacji wielostopniowej

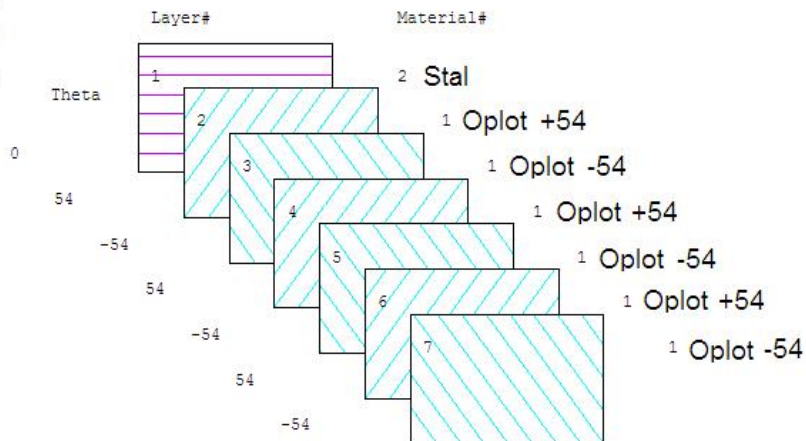
LAYER STACKING

```

ELEM   = 0
SECT   = 1
LAYERS :
TOTAL  = 7
SHOWN  :
FROM 1 TO 7

```

ANSYS



Rys. 6.27. Układ warstw w butli: warstwa 1 – liner stalowy; warstwy 2–7 – oplot kompozytowy butli

W modelu dyskretnym wyodrębnione zostało siedem warstw. Pierwsza warstwa to stalowy liner, modelowany jako ciało izotropowe. Ze względu na wysokie ciśnienie, działające na butle stalową, liner pracuje w zakresie sprężysto-plastycznym. Dlatego w symulacji zastosowano sprężysto-plastyczny model materiału ze wzmocnieniem izotropowym. Pozostałe sześć warstw to model oplotu z włókna szklanego. Każda z tych warstw odpowiada wiązkom ułożonym naprzemiennie pod kątem $+54^\circ$ oraz -54° (rys. 6.27). Każda wiązka oplotu, ze względu na jednokierunkowe ułożenie włókien, może być modelowana jako materiał poprzecznie izotropowy (z wyróżnionym jednym kierunkiem). Takie podejście do modelowania warstwy kompozytowej wymaga wyznaczenia dla niej efektywnych właściwości materiałowych, które są wypadkową właściwości włókna i żywicy. W prezentowanym przykładzie do wyznaczania efektywnych właściwości mechanicznych wiązki kompozytu z jednokierunkowo ułożonymi włóknami zastosowana została metoda homogenizacji.

Dane materiałowe włókna i żywicy, z których wykonane są butle, są następujące:

$$\begin{aligned} E_f &= 73 \text{ GPa}; & E_m &= 3 \text{ GPa} \\ \nu_f &= 0,2; & \nu_m &= 0,38. \end{aligned}$$

Udział objętościowy włókna przyjęto: $V_f = 0,6$.

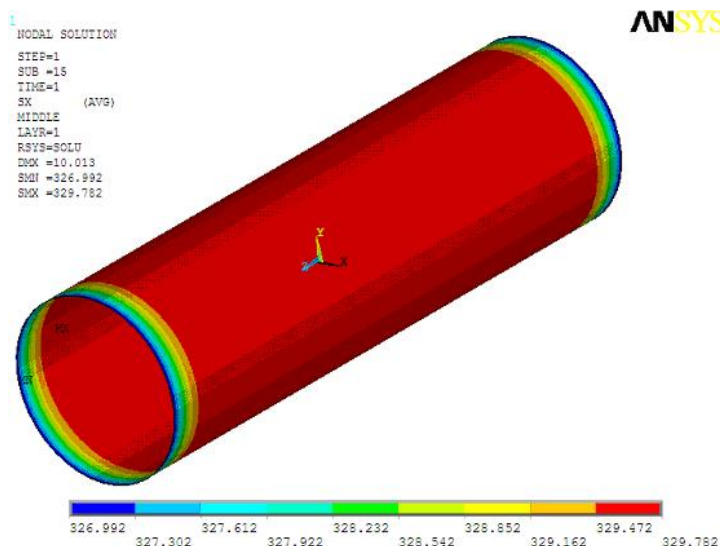
Wartości efektywnych właściwości materiałowych pojedynczej warstwy kompozytu są następujące:

$$\begin{aligned} E_1 &= 45,03 \text{ GPa}; & G_{12} &= G_{13} = 3,87 \text{ GPa}; & \nu_{12} &= \nu_{13} = 0,263 \\ E_2 &= E_3 = 11,38 \text{ GPa}; & G_{23} &= 3,93 \text{ GPa}; & \nu_{23} &= 0,45 \end{aligned}$$

Tak wyznaczone efektywne właściwości materiałowe użyte są następnie do modelowania sześciu warstw (wiązek) oplotu butli. Pełną charakterystykę warstw użytych do modelowania ścianki części walcowej butli przedstawiono na rys. 6.27. Model części walcowej butli obciążony został ciśnieniem wewnętrznym o wartości 610 barów. Dla takiego przypadku obciążenia wyznaczone zostały mapy naprężeń w każdej warstwie kompozytu oraz w stalowym linerze. Zgodnie z przedstawionymi wynikami (rys. 6.28) liner stalowy o zadanym ciśnieniu ulega całkowitemu uplastycznieniu i traci swoją nośność. Naprężenia w pierwszej warstwie oplotu osiągają wartość równą około 380 MPa. Taki poziom naprężeń może prowadzić do zniszczenia tej warstwy, co może zainicjować proces zniszczenia całej butli.

Analiza fraktalna

W opublikowanych pracach z udziałem autora zaproponowano inny sposób modelowania wykorzystujący niestandardowe narzędzia matematyczne, jak np. fraktale [34, 36, 90, 91, 137] oraz wyniki pomiarów EA. Chodzi o to, aby na podstawie eksperymentu, np. badań ciśnieniowych zbiorników z różnymi wzorami mozaikowymi, zebrać sygnały EA, a następnie znaleźć opis procesu niszczenia materiału kompozytowego za pomocą analizy fraktalnej naśladującej, symulującej



Rys. 6.28. Naprężenia wzdłuż włókien w warstwie 3

proces niszczenia materiału, z którego zbudowany jest wirtualny zbiornik kompozytowy. Pierwsze próby zostały przeprowadzone z sukcesem, co zostało opisane w cytowanych wcześniej pracach.

Automaty komórkowe

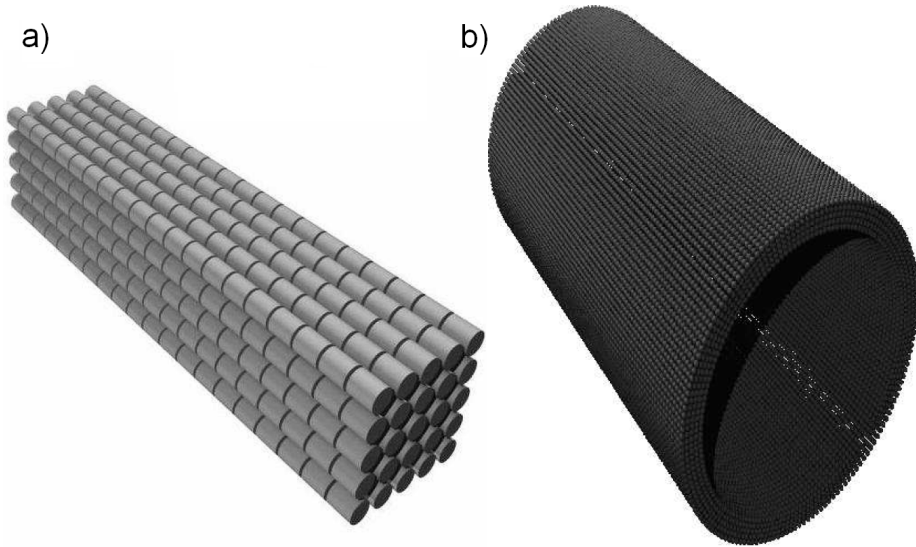
Wytrzymałość konstrukcji kompozytowych zawsze związana jest z dużą wytrzymałością włókien wzmacniających materiał, dlatego metody opisu, symulacji numerycznych takich układów są skoncentrowane na procesach uszkodzenia włókien. W przypadku butli wysokociśnieniowych materiał kompozytowy to zawsze żywica i zatopione w niej włókna wzmocnienia. Jednym ze sposobów modelowania i opisu procesów uszkodzenia kompozytów na wysokociśnieniowe zbiorniki jest technika numeryczna oparta na automatach komórkowych. W porównaniu ze standardową MES ma to wiele zalet. Przede wszystkim automaty komórkowe, jako abstrakcyjne obiekty matematyczne, mogą być wyposażone w wiele charakterystyk niedostępnych w języku MES. Sam proces pęknięcia włókien ma charakter losowy i modelujemy go, zadając prawdopodobieństwo zerwania.

Każde włókno wzmocnienia modelowane jest łańcuchem automatów komórkowych. Utrata kontaktu pomiędzy sąsiadującymi automatami wchodzącymi w skład tego samego włókna, oznacza pęknięcie włókna. Zarówno model oparty na automatach komórkowych, jak i podejście oparte na MES, zastępują ciągle rozkłady materiałów elementami dyskretnymi. Jest to szczególnie dogodne w metodach numerycznych. Z drugiej strony, w zakresie makroskopowych skal długości, materiały konstrukcyjne (w tym również materiały kompozytowe) opisujemy metodami mechaniki ośrodków ciągłych. Kluczowe znaczenie ma zatem sposób przenoszenia opisu mikroskopowych procesów zrywania włókien do zakresu makroskopowego.

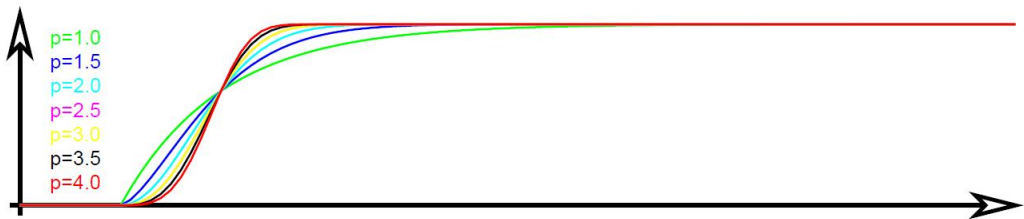
Proponowany model oparto na dwóch zasadniczych założeniach. W zakresie mikroskopowym defektem jest pojedynczy punkt zerwania włókna. Jednak włókna w materiale kompozytowym oddziałują pomiędzy sobą przez matrycę. Kontakt między włóknem i matrycą zakłada równość odkształceń. Dlatego bliskie sobie punkty zerwania włókien są skorelowane. Spiętrzenie naprężeń w otoczeniu punktu zerwania włókna powoduje również spiętrzenie naprężeń w otoczeniu dostatecznie blisko położonych innych punktów zerwania. W efekcie, w zakresie makroskopowych skal długości, defekty nie są już wyłącznie pojedynczymi punktami, lecz tworzą klastry składające się ze skorelowanych punktów zerwania włókien. Makroskopowe uszkodzenie próbki (lub kompozytowej ścianki zbiornika) powstaje, kiedy taki klaster staje się dostatecznie duży i gęsty. Jednak takim intuicyjnym terminom należy też nadać precyzyjny sens matematyczny [1, 2, 96, 174].

Stosunkowo łatwo odpowiedzieć na pytanie dotyczące krytycznego makroskopowego rozmiaru skorelowanego defektu. Poddana badaniom wytrzymałościowym próbka ulega uszkodzeniu, kiedy defekt osiąga rozmiary rzędu liniowych rozmiarów próbki. Znacznie trudniejszy okazuje się opis gęstości skorelowanego defektu. Jednocześnie w ujęciu makroskopowym ogromnym zagrożeniem jest największe skupienie blisko siebie położonych punktów zerwania włókien. Dogodnym, proponowanym językiem opisu okazuje się geometria fraktalna [175, 176], szczególnie wymiary fraktalne. Przypuśćmy, że mamy dwa zbiory A i B o wymiarach fraktalnych odpowiednio D_A oraz D_B . Powiedzmy, że zbiór A ma większy wymiar $D_A > D_B$. W takim przypadku suma mnogościowa, zbiór $A \cup B$ będzie miał wymiar równy D_A . Zbiór o mniejszym wymiarze staje się niewidoczny. Intuicyjnie, im większy wymiar zbioru, tym gęściej upakowane są punkty wchodzące w skład tego zbioru. Znamy wiele różnych wymiarów fraktalnych. W rozważaniach teoretycznych szczególnie znaczenie mają wymiary związane z miarami. Umożliwia to opis w jednym języku i struktur zbiorów, i wielkości zbiorów (w naszym przypadku skorelowanych defektów). Jednak nie zawsze istnieją algorytmy numeryczne umożliwiające wyznaczenie tych charakterystyk. Przykładem mogą być miary i wymiary Hausdorffa. Dlatego w analizie przeprowadzonych symulacji najczęściej bada się wymiar pudełkowy (*box-counting*). Jednak wtedy brak jest stowarzyszonej miary i zmuszeni jesteśmy do wykorzystania innej wielkości, o nie do końca znanych właściwościach matematycznych. Z drugiej strony, w testowanych przykładach takie pseudomiary dobrze oddają rozmiary zbiorów [109, 110].

Symulacje numeryczne przeprowadzono dla dwóch typów próbek. Pierwszy to próbki prostopadłościennne ze wzmocnieniem o równoległym układzie włókien. W porównaniu do zbiorników, można to uważać za model pojedynczej warstwy wzmocnienia z przepłotem. Uzyskanie rozsądnej dokładności rezultatów wymaga wielkiej liczby automatów komórkowych rzędu 10^6 . Oczywistym ograniczeniem są moce obliczeniowe komputerów. Jednocześnie dostępne komercyjne oprogramowanie dla metod elementów skończonych oferuje znacznie mniejszą maksymalną



Rys. 6.29. Dwa typy próbek z symulacji numerycznych:
a) prostokątna, b) typu NOL. Na rysunku znacznie zmniejszono liczbę automatów komórkowych w stosunku do rzeczywistych symulacji



Rys. 6.30. Kształt funkcji Weibulla dla różnych parametrów

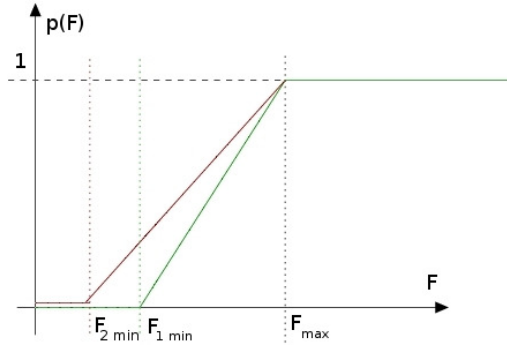
liczbę elementów dyskretnych [36]. Drugi typ symulowanych próbek to próbki typu NOL. Wzmocnienie było obwodowe (rys. 6.29).

Prawdopodobieństwo zerwania, utraty kontaktu pomiędzy sąsiadującymi automatami na jednostkę czasu opisuje funkcja Weibulla. Ma ona postać zgodną z równaniem (6.9). Przykładowe kształty takich funkcji przedstawiono na rysunku 6.30.

$$P(F) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{F}{a} \right)^p \right\} \quad (6.9)$$

gdzie a oznacza parametr skali, a liczba p określa typ rozkładu. Dla kompozytów powinno być: $p > 1$.

W symulacjach numerycznych kształt funkcji Weibulla został zastąpiony linią łamaną przedstawioną na rysunku 6.31. Maksymalna siła (dla pojedynczego włók-



Rys. 6.31. Aproxymacja funkcji Weibulla linią łamaną zastosowana w symulacjach

na) $F_{\max}$ jest stała w czasie symulacji. Wynika to z maksymalnej wytrzymałości włókna. Natomiast siła $F_{\min}$ zmienia się w zależności od układu punktów zerwania włókien w otoczeniu badanego automatu komórkowego (tak jak np. $F_{1 \min}$ na $F_{2 \min}$ przedstawiono na rys. 6.31). Taka zmiana powoduje wzrost prawdopodobieństwa zerwania.

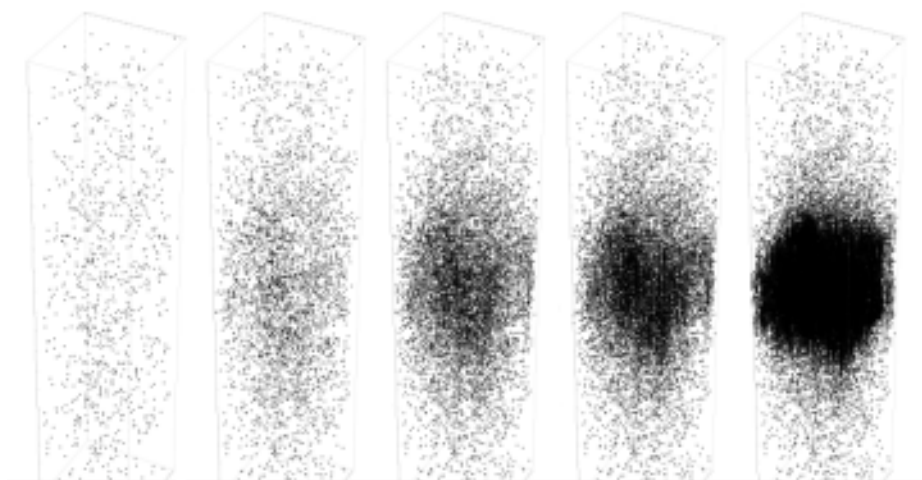
Wzrost prawdopodobieństwa zerwania od wartości $P(F)$ do wartości $P(F) + \Delta P$ wynika z rozkładu punktów zerwania:

$$\Delta P = \sum_i f(F, r_i), \quad f(F, r) = A(F) (r + B)^\alpha \quad (6.10)$$

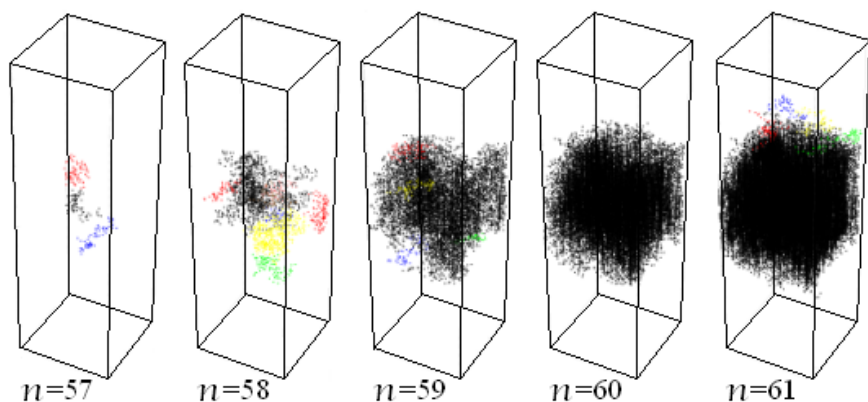
Sumujemy wyniki ze wszystkich punktów zerwania wewnątrz przyjętego obszaru oddziaływania. Kształt funkcji f związany jest z efektem karbu wprowadzonego przez każdy punkt zerwania. W każdej (dyskretnej) jednostce czasu obliczone są dla każdego automatu prawdopodobieństwa przejścia ze stanu niezerwanego do stanu zerwanego, a następnie generator losowy decyduje o zmianie stanu [138].

Rezultaty symulacji dla próbki prostokątnej przedstawiono na rysunku 6.32. Jak widać, rozkład punktów zerwania jest bardzo nieregularny i trudno go opisać. Jakościowa ocena gęstości zerwań niewiele daje w przypadku takich chmur punktów. Znacznie więcej informacji otrzymamy, śledząc największe klastry skorelowanych defektów, co przedstawiono na kolejnym rysunku 6.33.

Jednak zniszczenie, pęknięcie próbki zależy od największego, najszybciej rosnącego klastra skorelowanych defektów. Generalnie proces narastania uszkodzeń dzieli się na dwa etapy. Początkowo włókna pękają losowo. Rozkład przestrzenny punktów zerwania jest prawie jednorodny. W pewnej chwili jeden z klastrów zaczyna dominować. Teraz proces zmienia charakter; następuje bardzo szybki wzrost największego skorelowanego defektu. Jest to wywołane przyłączaniem do defektu sformowanych już poprzednio mniejszych klastrów, a nie – jak w początkowych etapach – pojedynczych zerwań (np. rys. 6.34).



Rys. 6.32. Symulacje procesu zrywania włókien w próbce prostopadłościennej

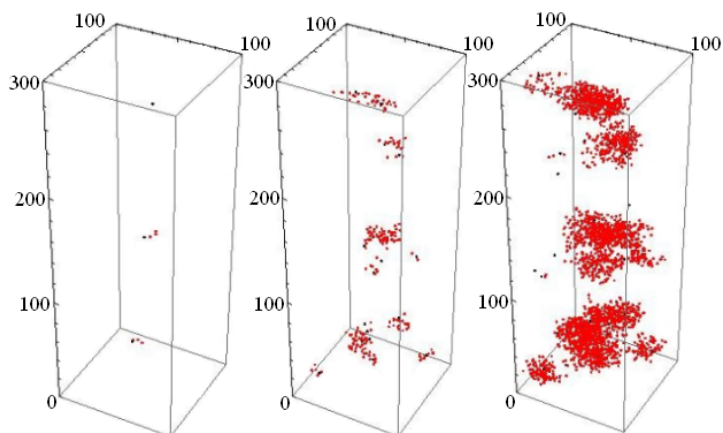


Rys. 6.33. Symulacje procesu zrywania włókien w próbce prostopadłościennej. Największe klastry oznaczono różnymi kolorami. Symulacje wykonano dla stałej siły. Umowny bezwymiarowy czas oznaczono jako n

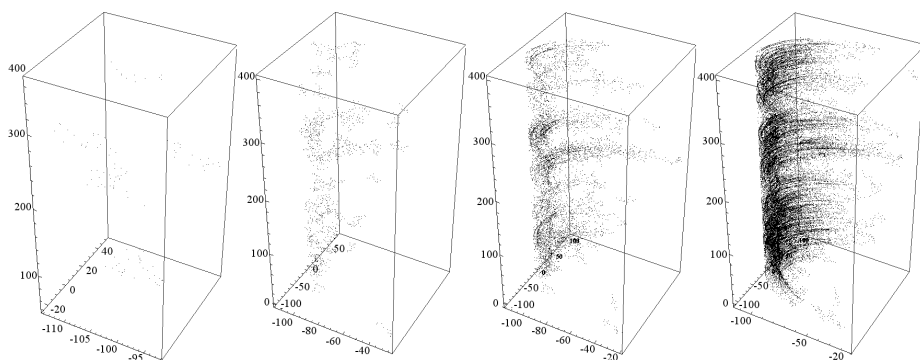
Podobny proces można również obserwować w próbkach typu NOL (rys. 6.35). Jednak jest on dosyć mylący – pozorne koncentracje punktów zerwania wynikają wyłącznie z obserwacji pod różnymi kątami.

Proponowanym językiem opisu rezultatów symulacji jest geometria fraktalna. Wykresy pseudomiar i wymiarów pudełkowych dla prostopadłościennej próbki przedstawiono na rysunku 6.36.

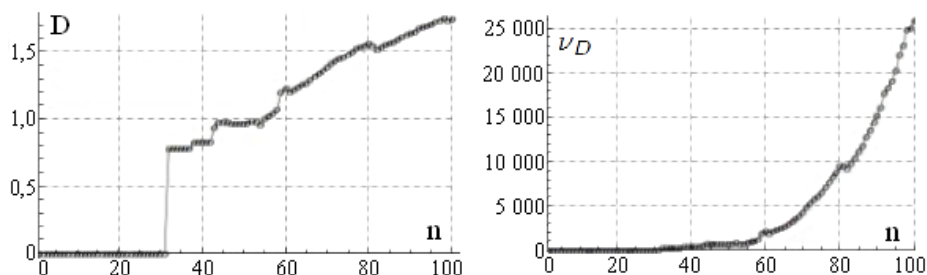
Wykonane symulacje dobrze opisują proces zrywania włókien w materiałach kompozytowych. Należy podkreślić, że obliczenia przeprowadzono dla próbek,



Rys. 6.34. Symulacje procesu zrywania włókien w prostokątnej próbce. Pokazano tylko wzrost dominującego klastra



Rys. 6.35. Symulacje procesu zrywania włókien w próbkach typu NOL. Pozorne koncentracje punktów zerwania wynikają wyłącznie z geometrii próbki



Rys. 6.36. Typowe wykresy pseudomiar ν_D i wymiarów pudełkowych D dla procesu wzrostu defektów w próbkach prostokątnych. Pierwsza niestabilność pojawia się dla $n \simeq 60$ (n oznacza umowny bezwymiarowy czas)

a nie dla całych zbiorników. W przypadku próbek można taki proces śledzić w układzie rzeczywistym, np. wykorzystując tomografię materiałową. Dla całych zbiorników nie jest to na razie możliwe ze względu na dostępne za małe moce obliczeniowe. Praktycznie najważniejszym rezultatem jest wykrycie momentu niestabilności, kiedy dominujący klaster zaczyna rozrastać się w bardzo szybki sposób, prowadząc do uszkodzenia próbki lub zbiornika. Znając ten moment można zapewnić bezpieczeństwo pracy konstrukcji.

7. Podsumowanie i wnioski

7.1. Podsumowanie

Określenie optymalnego wzoru mozaikowego wzmocnienia dla rur nawijanych, w których wszystkie lub część wiązek wzmocnienia jest ściskanych, zostało rozpoznane przez wielu badaczy. Chodzi o badania nawijanego materiału kompozytowego w postaci rur poddanych zginaniu, ściskaniu, skręcaniu, ciśnieniu zewnętrznemu itp. Zostało to przedstawione w rozdziale dotyczącym przeglądu literatury, gdzie autor cytował prace zarówno swoje, jak i innych badaczy. Natomiast optymalny wzór mozaikowy wzmocnienia rur kompozytowych, w których wszystkie wiązki włókien są rozciągane (czyli także butli kompozytowych poddanych ciśnieniu wewnętrznemu), nie był do tej pory dokładnie zbadany. Jest to związane ze specyfiką nawijanych materiałów kompozytowych przeznaczonych do zastosowań wysokociśnieniowych – należą one do układów złożonych, trudnych w wykonaniu i w badaniach eksperymentalnych oraz kosztownych.

W pracy autor przedstawił zarówno badania rur, jak i butli wykonanych metodą nawijania według różnych wzorów mozaikowych, ale o tym samym wzmocnieniu (ta sama ilość włókna wzmacniającego nawinięta pod tym samym kątem). Specjalnie do wytworzenia pełnego spektrum wzorów mozaikowych tego samego wzmocnienia wykorzystano autorską metodę tablicową. Według autora metoda ta była podstawą do zaplanowania i wykonania eksperymentów gwarantujących rzetelne porównanie wzmocnień kompozytowych rur i butli ciśnieniowych. Sukcesem tej pracy jest uzyskanie wyników z badań ciśnieniowych butli, które umożliwiają uszeregowanie wykonanych wzorów wzmocnień zgodnie z liczbą przepłotów występujących na jednostce długości. Niektóre z wymienionych dalej wyników badań i ich interpretacja dotyczą porównania dwóch skrajnych materiałów wykonanych według wzorów N_r1 i N_r2 . Wspomniane uszeregowanie wykonano ze względu na następujące wyniki badań eksperymentalnych:

- Wyznaczono liczbę przepłotów na długości skoku nawijania części cylindrycznej według zależności podanej przez autora. Najmniej przepłotów zawiera wzór mozaikowy N_r1 , najwięcej N_r2 . Różnica jest tym większa, im więcej wiązek użyje się do wypełnienia powierzchni walcowej butli, np. dla 11 różnica jest

trzykrotna, a dla 41 ponaddziesięciokrotna. Ma to szczególne znaczenie, gdy przeplot jest traktowany jako wada materiałowa.

- Najwyższe niszczące wartości ciśnień uzyskano dla butli ze wzmocnieniem wykonanym według wzoru mozaikowego N_r1 , a najniższe dla wzmocnienia nawiniętego według wzoru N_r2 . Jednak różnica ta wynosiła zaledwie 3%. Pozostałe butle ulegały zniszczeniu przy ciśnieniu pośrednim.
- Najwyższą wytrzymałością zmęczeniową charakteryzowały się także butle ze wzmocnieniem wykonanym według wzoru mozaikowego N_r1 , a najniższą – butle ze wzmocnieniem nawiniętym według wzoru N_r2 . Różnica w średniej liczbie zarejestrowanych cykli była prawie trzykrotna. Pozostałe butle ulegały zniszczeniu przy pośrednich liczbach cykli.
- W czasie badań ciśnieniowych butli z pomiarem EA, liczba zarejestrowanych zdarzeń akustycznych o amplitudzie powyżej 70 dB, czyli informującej o pękaniu włókien wzmocnienia, dla butli o wzorze N_r1 jest około dwukrotnie mniejsza niż liczba tych zdarzeń dla butli wykonanych według wzoru N_r2 . Ponadto wartość sygnału RMS w początkowej fazie obciążania jest także dwukrotnie wyższa dla butli wzmocnionych według wzoru N_r2 . Oznacza to znacznie szybsze powstawanie pęknięć w materiale z większą liczbą przeplotów.
- Grubość kompozytowej ścianki nośnej badanych butli: ścianka kompozytowa ze wzmocnieniem wykonanym według wzoru mozaikowego N_r1 jest cieńsza od ścianki wykonanej według wzoru N_r2 o około 2,5%. Oznacza to, że materiał wykonany według wzoru N_r1 zawiera nieznacznie większe wypełnienie włóknem.
- W metodzie nawijania pojawiające się zapowietrzenia w żywicy w postaci pęcherzy powietrza jest normalnym zjawiskiem. Podczas obserwacji mikroskopowych zglądów, wykonanych z badanych materiałów kompozytowych według różnych wzorów mozaikowych, okazało się, że udział pustek powietrznych w materiale z wzorem wzmocnienia N_r1 jest czterokrotnie niższy niż we wzorze N_r2 . Pozostałe butle zawierały pośrednie zawartości pustek powietrznych, które zwykle traktowane są jako wada, jednak normy dotyczące zbiorników kompozytowych nie zawierają zapisu dotyczącego kontroli tych wad.
- W czasie badań zmęczeniowych z użyciem kamery termowizyjnej na powierzchni próbek zawierających wzmocnienie N_r1 wiązki nawinięte jako ostatnie wyznaczają termiczny obrys rombów, czyli linie uskoków. Próbkę następną w szeregu według liczby przeplotów wykazują podobny efekt, ale już słabiej. Najbardziej nierównomierne pole temperatury występuje na powierzchni próbek ze wzmocnieniem według wzoru N_r2 . Oznacza to najbardziej nierównomierną pracę butli, których wzmocnienie wykonano według wzoru N_r2 .
- Badania porównawcze z wykorzystaniem EMWP dowodzą, że materiał kompozytowy butli wykonanej według wzoru N_r1 odkształca się równomiernie w obszarach, gdzie nie ma przeplotów, podobnie jak w przedstawionych wynikach badań z użyciem kamery termowizyjnej. Największe odkształcenia występują

w okolicach punktu centralnego i na liniach zgrupowania przeplotów. Nie zarejestrowano zmian odkształcenia w okolicach linii zgrupowania przeplotów za pomocą EMWP, szerografii i metody termowizyjnej.

Ponadto przeprowadzone eksperymenty umożliwiają charakterystykę procesu niszczenia materiałów kompozytowych wykonanych według różnych wzorów mozaikowych. Mechanizm powstawania pęknięć jest inny w zależności od liczby przeplotów użytego wzoru mozaikowego lub wielkości i liczby występujących rombów.

W obciążonej ciśnieniowo butli kompozytowej, której oplot wykonano według wzoru mozaikowego N_r1 , początkowo w obszarach bez przeplotów zaczyna pracować matryca żywiczna, pojawiają się pęknięcia o większej amplitudzie sygnałów EA. W materiale kompozytowym, wytworzonym według wzoru N_r1 , powstające pęknięcia powodują ujednolicenie występujących odkształceń i naprężeń lokalnych pomiędzy wiązkami włókien w obszarze rombu, czyli w obszarze bez przeplotów. Można zauważyć powstawanie pęknięć wzdłuż włókien na powierzchni pomiędzy liniami przeplotów. Z dalszym wzrostem ciśnienia liczba tych pęknięć rośnie, osiągając stan nasycenia, jednak ich długość jest ograniczona liniami przeplotów. Ostatnie stadium rozwoju uszkodzeń to połączenie się pęknięć pomiędzy obszarami nieprzeplecionymi (rombami) w punkcie centralnym (rys. 4.23, s. 66), gdzie rozpoczyna się zniszczenie butli.

Niekorzystna linia uskoków i przeplotów oraz punkt centralny, które mają nawijane materiały kompozytowe według wzoru N_r1 , charakteryzują się najlepszą zdolnością kumulowania w sobie uszkodzeń w postaci długich pęknięć, które powodują ujednolicenie występujących naprężeń pomiędzy wiązkami włókien w obrębie linii uskoków i przeplotów. Następne wzory mozaikowe w szeregu według liczby przeplotów mają coraz krótsze odległości pomiędzy liniami przeplotów i uskoków, a niekorzystnych punktów centralnych jest także coraz więcej. Jest to związane z powstawaniem coraz większej liczby mniejszych rombów, a z nimi punktów centralnych. Ostatni w tym szeregu wzór mozaikowy N_r2 ma romby nierozpoznawalne o rozmiarach jednej wiązki oraz składa się praktycznie z samych punktów centralnych. Dlatego powstające pęknięcia mają zupełnie inny charakter, powstają w punktach centralnych pomiędzy wiązką górną i dolną, mają znamiona rozwarstwienia oraz jest ich znacznie więcej, o nieco mniejszej energii, w porównaniu ze wzmocnieniami według N_r1 , co potwierdzają wyniki badań z EA. W materiale kompozytowym butli, wzmocnionym zgodnie ze wzorem mozaikowym N_r2 , w czasie obciążania ciśnieniem występują pęknięcia translaminarne pomiędzy warstwami. W tych wzorach znajduje się wiele punktów centralnych, które nie mogą zatrzymać pęknięć (typu *splitting*) powstających między wiązką górną i dolną we wzorze. Ten mechanizm w konsekwencji przyczynia się do wcześniejszego zniszczenia tego materiału kompozytowego w porównaniu ze wzmocnionym według wzoru N_r1 .

7.2. Wnioski

Optymalnym wzorem mozaikowym wykorzystywanym w metodzie nawijania do wytwarzania kompozytowych rur i butli wysokociśnieniowych jest wzór o najmniejszej liczbie przeplotów, czyli N_r1 . W materiale kompozytowym tak wzmocnionym powstające pęknięcia powodują ujednolicenie występujących naprężeń pomiędzy wiązkami włókien w obszarze rombu, czyli w obszarze bez przeplotów. Materiał w czasie obciążania pracuje równomiernie, bez lokalnych znaczących różnic w naprężeniach między sąsiednimi wiązkami.

Proces destrukcji materiału kompozytowego wykonanego według wzoru N_r2 , pod obciążeniem ciśnieniem wewnętrznym, przebiega zupełnie inaczej niż w butlach ze wzmocnieniem ułożonym według wzoru N_r1 . Powstające pęknięcia są krótkie, ponieważ odległość pomiędzy sąsiednimi przeplotami jest mała, zwykle wynosi tyle, ile szerokość wiązki. Pęknięcia te powstają pomiędzy wiązkami górną i dolną, gdzie włókna się krzyżują. Nie ma tam możliwości ujednolicenia lokalnych naprężeń, jak w materiale wykonanym według wzoru N_r1 . Dlatego ten materiał ulega szybciej zniszczeniu, zwłaszcza w badaniach zmęczeniowych, w których liczba cykli ciśnienia do zniszczenia jest średnio prawie trzy razy mniejsza niż w materiale wykonanym według wzoru N_r1 .

Z użyciem metod: termowizyjnej, EMWP, ŚSB, skanera światła strukturalnego ustalono, że najbardziej wyężone obszary to linie uskoków z punktem centralnym, a nie linie zgrupowania przeplotów, jak sądzono wcześniej. Linie uskoków są kluczowymi miejscami destrukcji materiału wykonanego metodą nawijania. Na liniach zgrupowania przeplotów występuje coś w rodzaju niwelowania się odkształceń (naprężeń), ponieważ na tych liniach przeploty występują na zmianę – raz w prawo, raz w lewo (rys. 4.23). Metodą szerografii udało się wykryć wady materiałowe związane z zapowietrzeniem, nadmiernym udziałem żywicy, pęknięciami itp. Efekty związane z przeplotami nie są wykrywalne tą metodą.

Niekorzystne efekty związane z liniami przeplotów i uskoków oraz punktami centralnymi częściowo można ograniczyć przez zwiększenie liczby warstw oraz grubości ścianki kompozytowej butli, zwiększenie szerokości wiązki oraz zmniejszenie jej wysokości. Inne sposoby, które nie były badane w pracy, a wydają się skuteczne, to przesunięcia warstw, nawijanie warstw naprzemiennych oraz wzory dwuwarstwowe (por. pkt 4.2.5).

Zaproponowano modele obliczeniowe wykorzystujące MES i metodę homogenizacji, analizę fraktalną, automaty komórkowe oraz użycie w tych modelach zależności związanych z liczbą i geometrią przeplotów. Wydają się one równie obiecujące jak obecnie stosowane i opisane w dostępnej literaturze przedmiotu.

Bibliografia

- [1] ANISZEWSKA D., RYBACZUK M., *Physical stability and critical effects in models of fractal defects evolution based on single fractal approximation*, Chaos, Solitons & Fractals, 2007, **32**, s. 246–251.
- [2] ANISZEWSKA D., RYBACZUK M., *Fractal characteristics of defects evolution in parallel fibre reinforced composite in quasi-static process of fracture*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, **52**, s. 91–95.
- [3] BEŁZOWSKI A., *Próby wytrzymałości kompozytowych urządzeń ciśnieniowych – analiza uregulowań krajowych i zagranicznych*, III Ogólnopolska Konferencja – Kompozyty i Kompozycje Polimerowe, Szczecin–Świnoujście, 16–18.06.1997, s. 201–206.
- [4] BEŁZOWSKI A., *O możliwościach zastosowania światłowodów do wykrywania uszkodzeń w kompozytach polimerowych*, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, III Konferencja Naukowo-Techniczna, Ustroń, 6–9.10.1996, s. 1–8.
- [5] BEŁZOWSKI A., BŁAŻEJEWSKI W., *Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe – typy konstrukcji oraz ich zastosowanie i metody badań*, Tworzywa sztuczne w budowie maszyn, IX Seminarium, Kraków, 27–29.09.2000, s. 29–32.
- [6] BEŁZOWSKI A., BŁAŻEJEWSKI W., *Zbiorniki wysokociśnieniowe z kompozytów polimerowych*, Pneumatyka, Wrocław, 2000, **5**, s. 32–35.
- [7] BEŁZOWSKI A., BŁAŻEJEWSKI W., *Badania wysokociśnieniowych butli kompozytowych jako zbiorników alternatywnego paliwa gazowego pojazdów*, Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Sekcja Mechaniki Ciała Stałego Komitetu Mechaniki PAN, PTMTiS, Katedra Mechaniki Stosowanej Politechniki Białostockiej, Augustów, 23–26.05.2001, s. 31–38.
- [8] BEŁZOWSKI A., BŁAŻEJEWSKI W., *Zbiorniki wysokociśnieniowe z kompozytów polimerowych montowane w pojazdach oraz przenośne*, Dozór Techniczny, 2001, **3**, s. 53–57.
- [9] BEŁZOWSKI A., BŁAŻEJEWSKI W., *Badania ciśnieniowe zbiorników typu CNG-3 i CNG-4*, Materiały polimerowe, Pomerania-Plast 2001, Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, 6–8.06.2001, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2001, s. 51–52.
- [10] BEŁZOWSKI A., STASIEŃKO J., ZIÓŁKOWSKI B., KAMIŃSKA A., *Niektóre kryteria akceptacji defektów w kompozytach na przykładzie laminatu ciętego strumieniem wody*, Kompozyty, 2004, **4**, 12, s. 389–395.
- [11] BEUKERS A., KOUSSIOS S., BERGSMA O., *Composite pressure vessels design: integral determination of winding patterns*, 16th International conference on composite materials, Kyoto, Japan, 2007.

- [12] BĘDZIŃSKI R., *Badania modelowe wybranych węzłów konstrukcyjnych metodą elastooptyczną i interferometrii holograficznej*, Prace Naukowe Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.05., temat nr 02.02.03, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1990.
- [13] BENEDIKT B., RUPNOWSKI P., KUMOSA L., SUTTER J.K., PREDECKI P.K. KUMOSA M., *Determination of Interlaminar Residual Thermal Stresses in a Woven 8HS Graphite/PMR-15 Composite Using X-Ray Diffraction Measurements*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2002, **9**, s. 375–394.
- [14] BŁASZCZAK T., BŁAŻEJEWSKI W., SANKOWSKA A., *Stress state of high pressure composite tank examination with the optical fiber sensor*, 19th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, Abstracts, Committee for Mechanics of the Polish Academy of Sciences, Institute of Aeronautics and Applied Mechanics, Warsaw University of Technology, Polanica Zdrój, 25–28.09.2002, s. 182–183.
- [15] BŁASZCZAK T., BŁAŻEJEWSKI W., WIEWIÓRSKI P., *Ocena bezpieczeństwa eksploatacji kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych przy użyciu czujników zintegrowanych na bazie włókien węglowych*, XX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, Polanica Zdrój, 25.09.2002, s. 59–62.
- [16] BŁAŻEJEWSKI W. *Badania nad mechaniką zbrojenia i technologią wytwarzania naczyń wysokociśnieniowych na przykładzie lekkich butli lotniczych*, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 500/2730/26, Wrocław, 1995.
- [17] BŁAŻEJEWSKI W., *Kompozyt długowłóknisty jako programowalny materiał butli wysokociśnieniowej*, XVII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 17–19.10.1996, s. 87–92.
- [18] BŁAŻEJEWSKI W., *Wybór nawoju metodą tablicową na przykładzie skręcanych rur ES*, III Ogólnopolska konferencja – kompozyty i kompozycje polimerowe, Szczecin–Świnoujście, 16–18.06.1997, s. 221–222.
- [19] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., MYSZKA W., *Badania rur ES przy skręcaniu z wykorzystaniem EA*, raport IMMT, III Letnia Szkoła Mechaniki Pękania, Szklarska Poręba, 22–28.06.1997.
- [20] BŁAŻEJEWSKI W., *Ciśnieniowe badania niszczące kompozytowych rur nawijanych*, VI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Politechnika Świętokrzyska, Kielce–Ameliówka, 22–24.09.1997, **62**, s. 43–50.
- [21] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., *Nieniszczące badania ciśnieniowe butli epoksydowo-szklanych z wykorzystaniem EA*, raport IMMT, Wrocław, 1997.
- [22] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., *Ocena stanu kompozytu epoksydowo-szklanego metodą EA*, XVII Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz–Pieczyńska, 05.1998, s. 27–32.
- [23] BŁAŻEJEWSKI W., PSZONKA A., GASPEROWICZ A., TRACZEWSKI A., *Badania butli wysokociśnieniowych z kompozytowym opłotem hybrydowym metodą EA*, III Konferencja naukowo-techniczna, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, Ustroń, 6–9.10.1998, tom II, s. 61–68.
- [24] BŁAŻEJEWSKI W., NARBUDOWICZ K., *Metoda tablicowa w projektowaniu kompozytowych elementów nawijanych*, III Konferencja naukowo-techniczna, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, Ustroń, 6–9.10.1998, tom I, s. 241–242.

- [25] BŁAŻEJEWSKI W., FILIPIAK J., *Odkształcenia kompozytowych butli wysokociśnieniowych*, III Konferencja naukowo-techniczna, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, Ustroń, 6–9.10.1998, tom I, s. 243–244.
- [26] BŁAŻEJEWSKI W., FILIPIAK J., *Odkształcenia nawojów w epoksydowo-szklanych elementach kompozytowych*, XVIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka k. Warszawy, 17–19.10.1998, s. 155–160.
- [27] BŁAŻEJEWSKI W., *Typy niszczenia kompozytowych butli wysokociśnieniowych*, VI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania, Politechnika Świętokrzyska, Kielce–Cedzyna, 23–25.09.1999.
- [28] BŁAŻEJEWSKI W., *Wpływ struktury nawijania włókna na wytrzymałość elementów walcowych wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego*, Raporty IMiMT PWr., 1999, Ser. PRE **13**, s. 112, Rozprawa doktorska, 03.12.1999, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław, 1999.
- [29] BŁAŻEJEWSKI W., LACH I., *Problem przepływu włókna w kompozytowej strukturze nośnej butli i rur nawijanych*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, Ustroń, 31.05.–2.06.2000, Katedra Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000, s. 95–100.
- [30] BŁAŻEJEWSKI W., BEŁZOWSKI A., *Projektowanie i wytwarzanie kompozytowych zbiorników ciśnieniowych metodą nawijania*, Tworzywa sztuczne w budowie maszyn, IX Seminarium, Referaty, Kraków, 27–29.09.2000, s. 37–42.
- [31] BŁAŻEJEWSKI W., CHMIELARCZYK P., LANGKAMP A., *Ciśnieniowe badania rur kompozytowych w złożonym stanie naprężeń*, 19th Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Institute of Aeronautics and Applied Mechanics of Warsaw University of Technology, Jachranka, 18–20.10.2000, s. 133–138.
- [32] BŁAŻEJEWSKI W., *Influence of the winding fibers structures on mechanical strength of composite cylinder elements made up from epoxy-glass*, 17th Danubia-Adria Symposium on Experimental Method in Solid Mechanics, Prague, 11–14.10.2000 Eds. Stanislav Holy, Jiri Mastovsky, Karel Vitek, Czech Technical University, 2000, s. 37–39.
- [33] BŁAŻEJEWSKI W., *Metoda wyboru dowolnych struktur nawijania elementów kompozytowych przy użyciu nawijarek łańcuchowych*, Materiały polimerowe, Pomerania-Plast 2001, Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, 6–8.06.2001, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001, s. 53–54.
- [34] BŁAŻEJEWSKI W., CETERA A., *Fraktalne charakterystyki defektów powłoki nośnej zbiorników kompozytowych*, Materiały polimerowe. Pomerania-Plast 2001. Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, 6–8.06.2001, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001, s. 55–56.
- [35] BŁAŻEJEWSKI W., *Designing of composite manufacturing by the winding method*, Studia Geotechnica et Mechanica, 2001, **23**, 1/2, s. 33–42.
- [36] BŁAŻEJEWSKI W., CETERA A., *Fractal characteristics of composite pipes defects in torsion testing*, International Journal of Fracture, 2002, **113**, 3, s. 253–265.
- [37] BŁAŻEJEWSKI W., BUDNIK J., SANKOWSKA A., *Ocena wytrzymałości nośnego zbiorników kompozytowych przy użyciu czujników zintegrowanych*, Kompozyty – Konstrukcje warstwowe. II Sympozjon. Referaty, Wrocław–Karpacz, 7–9.11.2002, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2002, s. 45–53.

- [38] BŁAŻEJEWSKI W., KALETA J., BORKOWSKI W., *Techniki wytwarzania kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych oraz normy homologacyjne*, Kompozyty – Konstrukcje warstwowe, II Sympozjon. Referaty, Wrocław–Karpacz, 7–9.11.2002, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2002, s. 29–36.
- [39] BŁAŻEJEWSKI W., SANKOWSKA A., *Czujniki zintegrowane, monitorowanie stanu wyężenia kompozytowych zbiorników typu CNG w czasie eksploatacji*, Silniki gazowe 2003. Konstrukcja – badania – eksploatacja – paliwa odnawialne, VI Międzynarodowa konferencja naukowa, Częstochowa–Szczyrk, 2–6.06.2003, pod red. Adama Dużyńskiego, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2003. s. 93–101.
- [40] BŁAŻEJEWSKI W., FASSA B., *Wykorzystanie pomiarów emisji akustycznej w ocenie jakości ciśnieniowych zbiorników kompozytowych przeznaczonych do magazynowania paliw gazowych w pojazdach*, Silniki gazowe 2003. Konstrukcja – badania – eksploatacja – paliwa odnawialne, VI Międzynarodowa konferencja naukowa, Częstochowa–Szczyrk, 2–6.06.2003, pod red. Adama Dużyńskiego, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2003. s. 71–80.
- [41] BŁAŻEJEWSKI W., KALETA J., *Kompozytowe zbiorniki paliw gazowych w pojazdach*, Silniki gazowe 2003. Konstrukcja – badania – eksploatacja – paliwa odnawialne, VI Międzynarodowa konferencja naukowa, Częstochowa–Szczyrk, 2–6.06.2003 pod red. Adama Dużyńskiego, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2003. s. 81–92.
- [42] BŁAŻEJEWSKI W., KALETA J., *Composite high pressure tanks – construction, application, tests*, Zbiorniki cienkościenne. III Konferencja, Karłów, 20–23.09.2004, Ed. by Stefan Joniak, Poznań, Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej, 2004. s. 131–138.
- [43] BŁAŻEJEWSKI W., *Designing and manufacturing of high pressure composite tanks with winding method*, Zbiorniki cienkościenne. III Konferencja, Karłów, 20–23.09.2004, Ed. by Stefan Joniak, Poznań, Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej, 2004, s. 123–130.
- [44] BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., HUFENBACH W., BOEHM R., *Wytwarzanie i badanie kompozytowych próbek rurowych wzmocnionych włóknem szklanym*, Kompozyty, 2005, 5, 4, s. 67–71.
- [45] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., KALETA J., *Kompozytowe zbiorniki wysokociśnieniowe, Aktualne aspekty w zakresie wymagań, projektowania i badań*, Konferencja: Materiały Polimerowe, Pomorania-Plast, Szczecin–Kołobrzeg, 6–24.05.2007, s. 49–50.
- [46] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., KALETA J., *Metody eksperymentalne w badaniach wysokociśnieniowych butli kompozytowych na paliwa gazowe*, XI Krajowa naukowo-szkoleniowa konferencja mechaniki pękania, Kielce–Cedzyna, 9–12.09.2007, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2007, Referat zamieszczony na płycie CD.
- [47] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., PRZYGODA A., *Monitorowanie i symulacja defektu w kompozytowych obiektach cylindrycznych*, Badania eksperymentalne w mechanice ciała stałego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007. s. 13–18, Summ. (Prace Naukowe – Politechnika Warszawska, Mechanika, ISSN 0137-2335,

- z. 217), XXII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego imienia prof. J. Stupnickiego, Jachranka, 18–21.10.2006, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006 s. 161–166.
- [48] BŁAŻEJEWSKI W., GASPEROWICZ A., *Poszukiwania optymalnej struktury w metodzie nawijania włókna ciągłego*, Konferencja: Materiały Polimerowe, Pomerania-Plast, Szczecin–Kołobrzeg, 24.05.2007, s. 47–48.
 - [49] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., SANKOWSKA A., KALETA J., *Aplikacja światłowodowych metod czujnikowych do monitorowania ekstremalnie wyężonych konstrukcji kompozytowych*, I Kongres Mechaniki Polskiej, KMP 2007, Red. J. Kubik, W. Kurnik, W. K. Nowacki, Warszawa Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007, Referat zamieszczony na płycie CD.
 - [50] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., SANKOWSKA A., URBANOWICZ M., *Pomiary odkształceń opłotów nośnych zbiorników kompozytowych*, Konferencja: Materiały Polimerowe, Pomerania-Plast, Szczecin–Kołobrzeg, 24.05.2007, s. 51–52.
 - [51] BŁAŻEJEWSKI W., GASPEROWICZ A., GAŚSIOR P., KALETA J., *Kompozytowe zbiorniki dla CNG i wodoru, wymogi homologacyjne i metody badań*. Cz. 1, Czas na Gaz, 2006, **19**, s. 14–15.
 - [52] BŁAŻEJEWSKI W., GASPEROWICZ A., GAŚSIOR P., KALETA J., *Zbiorniki kompozytowe dla CNG i wodoru, wymogi homologacyjne i metody badań*. Cz. 2, Czas na Gaz, 2007, **20**, s. 24–25.
 - [53] BŁAŻEJEWSKI W., *Struktury nawijanych zbiorników wysokociśnieniowych: ocena współpracy włókien w kompozycie*, XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, 15–18.10.2008, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008.
 - [54] BŁAŻEJEWSKI W., *Zasady doboru struktur nawijania zbiorników wysokociśnieniowych*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2008, s. 19–28.
 - [55] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., KALETA J., *Interferometryczne czujniki światłowodowe w monitorowaniu wysokowyężonych zbiorników kompozytowych*, XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego, Jachranka, 15–18.10.2008, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, referat zamieszczony na płycie CD.
 - [56] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., KALETA J., KOTOWSKI P., *Quasi-statyczna próba rozrywania butli kompozytowych do gromadzenia paliw gazowych pod dużym ciśnieniem*, XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego, Jachranka, 15–18.10.2008, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Referat zamieszczony na płycie CD.
 - [57] BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., KALETA J., RYBCZYŃSKI R., *Wyznaczanie odkształcenia resztkowego oraz próba karbu w kompozytowych zbiornikach wysokociśnieniowych*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków, 2009, **106**, 1, s. 19–22.
 - [58] BŁAŻEJEWSKI W., DOMAŃSKI M., RYBCZYŃSKI R., WIEWIÓRSKI P., *Poszukiwania optymalnej struktury zbiorników kompozytowych wykonywanych z użyciem nawijarki sterowanej numerycznie*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków, 2009, **106**, 1, s. 15–18.

- [59] BŁAŻEJEWSKI W., *Metodyka doboru struktury kompozytowego oplotu nośnego zbiorników wytwarzanych metodą nawijania*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, Politechnika Krakowska, Kraków, 2009, **106**, 1, s. 9–14.
- [60] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J., *Bezpieczeństwo użytkowania zbiorników wysoko sprężonych paliw gazowych*, Gaz ziemny do napędu silników pojazdów maszyn i urządzeń, III konferencja naukowo-techniczna, Wałbrzych, 4–5.06.2009. Wrocław, SIMP Ośrodek Doskonalenia Kadr, 2009, s. 62–72.
- [61] BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., GĄSIOR P., PAWLAK T., HUFENBACH W., *Ciśnieniowe badania kompozytowych próbek rurowych wykonanych metodą wyplatania*, Kompozyty, 2009, **9**, 3, s. 291–296.
- [62] BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., GĄSIOR P., KALETA J., *Application of optical fiber based measuring techniques for strain field measurements in composite braided tube specimens*, 26th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, September 23rd-26th, 2009, Montanuniversität Leoben, Austria, Leoben, Institute of Mechanical Engineering, 2009, s. 15–16.
- [63] BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., GĄSIOR P., KALETA J. MECH R., *SMART composite high pressure vessels with integrated Optical Fiber Sensors*, Sensor and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems 2010, San Diego, California, United States, Masayoshi Tomizuka, SPIE, cop. 2010. 764712-1-764712-10, (SPIE Proceedings Series, Vol. 7647).
- [64] BŁAŻEJEWSKI W., *Zastosowanie metody tablicowej w projektowaniu oplotu kompozytowego butli wysokociśnieniowych*, Kompozyty, 2010, **10**, 2, s. 154–158.
- [65] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J. RYBCZYŃSKI R., *Badania kompozytowych butli wysokociśnieniowych w podwyższonych temperaturach*, Kompozyty, 2010, **10**, 3, s. 255–259.
- [66] BŁAŻEJEWSKI W., *Wykorzystanie metody emisji akustycznej w badaniach porównawczych kompozytowych butli wysokociśnieniowych*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne: praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010, s. 24–31.
- [67] BŁAŻEJEWSKI W., PANEK M., RYBCZYŃSKI R., WIEWIÓRSKI P., *Użycie metody tablicowej do sterowania nawijarką*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010, s. 40–41.
- [68] BŁAŻEJEWSKI W., *Techniki badawcze wykorzystywane do oceny stopnia wyczerpania oplotów nośnych kompozytowych butli wysokociśnieniowych*, Materiały polimerowe, praca zbiorowa pod red. Tadeusza Spychaja i Stanisławy Spychaj, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2010, s.111–116.
- [69] BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., WIEWIÓRSKI P., *Identyfikacja struktur nawijanych butli kompozytowych*, Materiały polimerowe, praca zbiorowa pod red. Tadeusza Spychaja i Stanisławy Spychaj, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2010, s. 121–122.
- [70] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J. RYBCZYŃSKI R., RYDAROWSKI H., SZUTER P., WIEWIÓRSKI P., *Badanie długowłóknistych materiałów kompozytowych na pełzanie*, Materiały polimerowe, praca zbiorowa pod red. Tadeusza

- Spychaja i Stanisławy Spychaj, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2010, s. 119–120.
- [71] BŁAŻEJEWSKI W., JANKOWSKI L.J., WIŚNIEWSKI W., *Comparative investigations of the composite pipes using photoelastic coating technique*, 27th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, September 22nd-25th, 2010, University of Technology, Wrocław, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Zarząd Główny, 2010, s. 15–16.
 - [72] BŁAŻEJEWSKI W., *Metodyka doboru struktury kompozytowego oplotu nośnego butli wytwarzanych metodą nawijania, przeznaczonych na wysoko sprężone paliwa gazowe*, Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego nr N N508 477534, 2010, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechniki Wrocławskiej, Raport serii Sprawozdania, 7/2013.
 - [73] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J., *Aspekty bezpieczeństwa w zakresie ciśnieniowego magazynowania wodoru w zbiornikach samochodowych*, Biuletyn Polskiego Stowarzyszenia Wodoru i Ogniwo Paliwowych, 2010, **5**, s. 22–28.
 - [74] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J., RYBCZYŃSKI R., *Kompozytowe butle wysoko sprężonych paliw gazowych – wytwarzanie i badania*, Dozór Techniczny, 2010, **5**, s. 87–92.
 - [75] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J., *Application of optical fibre sensors to measuring the mechanical properties of composite materials and structures*, Advances in composite materials – ecodesign and analysis, ed. by Brahim Attaf, Rijeka, InTech, cop. 2011, s. 221–246.
 - [76] BŁAŻEJEWSKI W., GĄSIOR P., KALETA J., RYBCZYŃSKI R., *Lekkie, wysokociśnieniowe, kompozytowe, monitorowane zbiorniki do paliw gazowych w pojazdach*, Przegląd Mechaniczny, 2011, **70**, 1, s. 13–20.
 - [77] BŁAŻEJEWSKI W., MAZIUK K., ZIÓŁKOWSKI B., ŻOŁYŃSKA K., *Defekty warstwy kompozytowej butli wysokociśnieniowych*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, monografia, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Cieszyń, 2011, s. 41–48.
 - [78] BŁAŻEJEWSKI W., KRYSIAK P., RYBCZYŃSKI R., *Analiza konstrukcji króćca wyjściowego butli kompozytowych typu 4 nowej generacji*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, monografia, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Cieszyń, 2011, s. 34–40.
 - [79] BŁAŻEJEWSKI W., *Metodyka doboru struktur kompozytowych*, Tworzywa Sztuczne w Przemśle, 2011, **2**, dod. Materiały Kompozytowe, **1**, s. 12–15.
 - [80] BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., MAŻULIS J., BIEROŃSKA K., *Metoda nawijania: projektowanie i wytwarzanie elementów kompozytowych metodą nawijania*, Materiały Kompozytowe, 2011, **0**, s. 39–42.
 - [81] BŁAŻEJEWSKI W., KALETA J., PANEK M., RYBCZYŃSKI R., *Emisja akustyczna w praktyce*, Materiały Kompozytowe, 2012, **1**, s. 18–22.
 - [82] BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., MIŁKOWSKI M., *Badania zbiorników wysokociśnieniowych przy użyciu szerografii – metody nieniszczącej*, Materiały Kompozytowe, 2012, **4**, s. 39–43.
 - [83] BŁAŻEJEWSKI W., JUSKOWIAK E., MAŻULIS J., RYBCZYŃSKI R., *Analiza struktury kompozytowej ścianki nośnej zbiorników wysoko sprężonych paliw gazo-*

- wych, referat konf. Poraj, Kompozyty Teoria i Praktyka, 2012, Kompozyty, 2013 (w przygotowaniu).
- [84] BŁAŻEJEWSKI W., JUSKOWIAK E., LISZKA I., KRZYŻAK A., *Wytwarzanie profili kompozytowych o wzmocnieniu ciągłym metodą pultruzji*, Materiały Kompozytowe, 2013, **1**, s. 51–54.
 - [85] BŁAŻEJEWSKI W., *Wpływ wzorów mozaikowych na rozwój uszkodzeń nawijanych rur kompozytowych*, X Konferencja, Nowe kierunki rozwoju mechaniki, Jarnołtówek, 21–23.03.2013, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika **101**, 348, s. 15–16, + płyta CD, s. 3.1–20.
 - [86] BŁAŻEJEWSKI W., CZAPLIŃSKI T., ZIĘTEK G., *Metoda homogenizacji w modelowaniu materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym ułożonym według wzorów mozaikowych*, Przetwórstwo tworzyw (w przygotowaniu), 2013.
 - [87] BROJER Z., HERTZ Z., PĘNCZEK P., *Żywice epoksydowe*, WNT, Warszawa 1982.
 - [88] BUDADIN O.N., KUTYURIN V.YU., KALEDIN V.O., *Diagnostics of the technical Condition of pressure vessels operating under internal pressure by a thermal (thermal imaging) method*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, **44**, 10, s. 669–675.
 - [89] BULMANIS W.N., *Wariant strukturalnej modeli rozruszenia armowanych namotanych kompozitów*, Mechanika kompozytowych materiałów, Moskwa, 1982.
 - [90] CETERA A., BŁAŻEJEWSKI W., *Fraktalny opis uszkodzenia kompozytu na przykładzie skręcanych rur ES*, Zmęczenie i mechanika pękania, Materiały XVIII sympozjum nt. Zmęczenie materiałów i konstrukcji, Bydgoszcz–Piecryska, 23–26.05.2000, Wydawnictwo Uczelniane ATR, 2000, s. 77–84.
 - [91] CETERA A., BŁAŻEJEWSKI W., *Fraktalne charakterystyki defektów skręcanych rur kompozytowych*, 19th Symposium on Experimental Mechanics of Solids. Institute of Aeronautics and Applied Mechanics of Warsaw University of Technology, Jachranka, 18–20.10.2000, s. 163–168.
 - [92] CLAUS S.J., HAHN H.T., *Processing-structure relationships for filament-wound composite shells*, Sixth Technical Conference on Composite Materials, Albany, NY, 10.1991, s. 866–872.
 - [93] CROUZEIX L., HERNANDEZ H., PERIÉ J. N., DOUCHIN B., ROBERT L., COLLOMBET F., *On the identification of mechanical properties using structural tests and optical methods*, Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, CROMeP, Ecole des Mines d'Albi Carmaux, 2006, 10 stron.
 - [94] CROUZEIX L., TORRES M., DOUCHIN B., PERIÉ J. N., COLLOMBET F., HERNÁNDEZ H., *Assessment of the winding pattern effects on the behaviour of filament wound pipes by using full field measurements and the equilibrium gap method*, Instituto Politécnico Nacional – México, Université de Toulouse – France, 2009, 10 stron.
 - [95] *Czas Na Gaz*, czasopismo, dwumiesięcznik popularno-informacyjny dot. rozwoju zasilania gazem pojazdów samochodowych, www.czasnagaz.com.pl
 - [96] CZOPOR J., RYBACZUK M., *Fibers breaking process in composites models and numerical simulations applying cellular automata*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, **52**, s. 154–157.

- [97] CZULAK A., HUFENBACH W., BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., *Badania porównawcze kompozytowych próbek rurowych*, XXIII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, 15–18.10.2008, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008, Referat zamieszczony na płycie CD.
- [98] CZULAK A., HUFENBACH W., BŁAŻEJEWSKI W., CZAPLIŃSKI T., GAŚSIOR P., *Badania kompozytowych rur smukłych przy obciążaniu osiowo symetrycznego ściskania*, XXIII Sympozjum mechaniki eksperymentalnej ciała stałego, Jachranka, 15–18.10.2008, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008, Referat zamieszczony na CD-ROM-ie załączonym do książki streszczeń.
- [99] DĄBROWSKI H., *Wstęp do mechaniki materiałów kompozytowych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
- [100] DOBRZAŃSKI L.A., NOWAK A.J., BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., *Badania długowłóknistych materiałów kompozytowych z wykorzystaniem metod niestandardowych*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, monografia, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Cieszyn, 2011, s. 151–159.
- [101] DOBRZAŃSKI L.A., NOWAK A.J., BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., *Koncepcja wewnątrzustrojowej protezy przetyku z wykorzystaniem wzmocnienia długowłóknistego*, Polimery i kompozyty konstrukcyjne, monografia, praca zbiorowa pod red. Gabriela Wróbla, Cieszyn, 2011, s. 141–150.
- [102] DOBRZAŃSKI L.A., NOWAK A.J., BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., *The concept of preparation of oesophageal prosthesis based on long-fibre composite material*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2011, **46**, 1, s. 18–24.
- [103] DOBRZAŃSKI L.A., NOWAK A.J., BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., *Non-standard test methods for long-fibrous reinforced composite materials*, Archives of Materials Science and Engineering, 2011, **47**, 1, s. 5–10.
- [104] ECKOLD G.C. *A design method for filament wound GRP vessels and pipework*, Composites, 1985, **16**, 1, s. 41–47.
- [105] www.erdgasautos.at, www.erdgasfahrzeuge.de
- [106] ESHELBY J.D., *The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems*, Proceedings of the Royal Society, **A241**, 1957, s. 376–396.
- [107] ESHELBY J.D., *The Elastic Field Outside an Ellipsoidal Inclusion*, Proceedings of the Royal Society, **A252**, 1959, s. 561–569.
- [108] European Natural Gas Vehicle Association, www.engva.com
- [109] FALCONER K., *Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications*, Chichester, New York, John Wiley & Sons, 1990.
- [110] FALCONER K., (1997) *Techniques in Fractal Geometry*, Chichester, New York, John Wiley & Sons, 1997.
- [111] FIGIEL A., *Analiza procesów pękania laminatów poliestrowo-szklanych w warunkach obciążenia długotrwałego i środowiska korozyjnego*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1988.
- [112] FRANCOIS D., GOŁASKI L., *Joint seminary on failure of advanced materials*, Paryż, 14–15.11.1994.
- [113] GAŚSIOR P., BŁAŻEJEWSKI W., KALETA J., *Smart fibre optic methods for structural health monitoring of high pressure vessels for hydrogen storage*, 18th

- World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC, 16–21.05.2010, Essen, Parallel sessions book **5**, Strategic analyses, safety issues, exiting and emerging markets, proceedings, Detlef Stolten, Thomas Grube (eds.), Jülich: Forschungszentrum Zentralbibliothek, 2010, s. 309–314, lokalizacja elektroniczna.
- [114] GAŚSIOR P., KALETA J., BŁĄŻEJEWSKI W., *Burst test of high pressure composite vessels for gaseous fuels storage*, 25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Ceske Budejovice, Cesky Krumlov, Czech Republic, 24–27.09.2008, s. 77–78.
 - [115] GAŚSIOR P., *Metodyka monitorowania wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych na paliwa gazowe z wykorzystaniem pomiarów odkształceń czujnikami światłowodowymi*, Raporty IMiMT PWr. Ser. PRE, Rozprawa doktorska, 2012, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław, 2012.
 - [116] GEMI L., TARAKCIOGLU N., AKDEMIR A., SAHIN S. O., *Progressive fatigue behaviour of glass/epoxy (± 75) filament-wound pipes under pure internal pressure*, Materials and Design, 2009, **30**, s. 4293–4298.
 - [117] GOŁASKI L., KUMOSA M., HULL D., *AE Testing of Filament Wound Pipes Under Repeated Loading*, J. Acoustic Emission, 1982, **2**, s. 95–101.
 - [118] GOMMERS B., VERPOEST I., VAN HOUTTE P., *The Mori-Tanaka Method Applied to Textile Composite Materials*, Acta Mater., **46**, 1998, s. 2223–2235.
 - [119] GRAYSON M., *Encyclopedia of composite materials and composites*, John Wiley & Sons, New York, 1983.
 - [120] HAMSTAD M. A., *A Review: AE, a Tool for Composite – Materials Studies*, Experimental Mechanics, 03.1986, s. 7–13.
 - [121] HANCOX N.L. *Fibre composite Hybrid Materials*, Applied Science publishers, London 1981.
 - [122] HERNANDEZ-MORENO H., DOUCHIN B., COLLOMBET F., CHOQUEUSE D., DAVIES P., *Influence of pattern on the mechanical Behavior of filament wound composite cylinders under external pressure*, Composites Science and Technology, 2008, **68**, s. 1015–1024
 - [123] HIPPEL P.A., JENSEN D.W., *Design and analysis of filament-wound cylinders in compression*, A Collection of Technical Papers: the 33rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Dallas, TX, USA, 04.1992, s. 2442–2453.
 - [124] HUFENBACH W., LANGKAMP A., KROLL L., BŁĄŻEJEWSKI W., *Failure analysis of textile-reinforced ceramic matrix composites*, Kompozyty, 2003, **3**, 7, s. 250–254,
 - [125] HUFENBACH W., BŁĄŻEJEWSKI W., KROLL L., BOEHM R., GUDE M., CZULAK A., *Manufacture and multiaxial test of composite tube specimens with braided glass fiber reinforcement*, Journal of Materials Processing Technology, 2005, **162/163**, s. 65–70.
 - [126] HUFENBACH W., BŁĄŻEJEWSKI W., CZULAK A., *Wytwarzanie rur metodą odśrodkową z materiałów hybrydowych*, Kompozyty, 2007, **7**, 4, s. 181–184.

- [127] HUFENBACH W., CZULAK A., BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., *Wysoko-ciśnieniowe zbiorniki kompozytowe wzmocnione wyplotem z włókna szklanego ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi*, Kompozyty, 2009, **9**, 2, s. 107–111.
- [128] HUFENBACH W., GUDE M., BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., BORKOWSKA A., *Manufacturing and pressure test using infrared camera of carbon fibre reinforced braided composite vessels*, Przetwórstwo Tworzyw, 2011, **6**, s. 448–453.
- [129] HUFENBACH W., GUDE M., CZULAK A., GAŚSIOR P., KRETSCHMANN M., *Manufacturing and pressure tests of braided vessels with integrated optical fiber sensors*, Przetwórstwo Tworzyw, 2011, **6**, s. 454–459.
- [130] HyComp – projekt 7 programu ramowego – www.hycomp.eu
- [131] HyCube – projekt 7 programu ramowego – www.hycube.eu
- [132] HYLA I., *Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych*, PWN, Warszawa, 1978.
- [133] HYLA I., *Elementy mechaniki kompozytów*, Politechnika Śląska, skrypt Nr 1945, Gliwice, 1995.
- [134] InGAS – projekt 7 programu ramowego – www.ingas.eu.org
- [135] JONES D.T., JONES I.A. and Middleton *Improving composite lay-up for nonspherical filament-wound pressure vessels*, Composites, 1996, **27A**, s. 311–317.
- [136] JENSEN D. W., PAI S. P., *Theoretical sensitivity of composite cylinders in compression to filament-winding pattern*, Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials (ICCM-9), Madrid, 1993, **3**, s. 447–454.
- [137] KALETA J., BŁAŻEJEWSKI W., GAŚSIOR P., RYBACZUK M., *Optimisation of the IV generation tanks for hydrogen storage applied in vehicles: modelling and experiment*, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010, May 16–21, 2010, Essen. Parallel sessions book 5, Strategic analyses, safety issues, exiting and emerging markets, proceedings, Detlef Stolten, Thomas Grube (eds.), Jülich: Forschungszentrum Zentralbibliothek, 2010, s. 25–31, (Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energy & Environment, ISSN 1866–1793; Vol. 78-4) Lokalizacja elektroniczna: <http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/4069/1/Hs1-5-Gasior.pdf>
- [138] KASPRZAK W., LYSIK B., RYBACZUK M., *Measurements, Dimensions, Invariant Models and Fractals*, Lviv, Wrocław, Spolom, 2004.
- [139] KŁOSOWSKA-WOLKOWICZ Z., PENCZEK P., KRÓLIKOWSKI W., CZUB P., PIELICHOWSKI J., OSTRYSZ R., *Nienasycone żywice poliestrowe*, WNT, Warszawa, 2010.
- [140] KOŚCIUK J., BŁAŻEJEWSKI W., RYBCZYŃSKI R., *Przemieszczanie nawiniętego wzmocnienia kompozytowego zbiornika ciśnieniowego*, Raporty Instytutu Historii Architektury Politechniki Wrocławskiej, 2011, Ser. PRE nr 449 oraz Przetwórstwo Tworzyw, 2011, **6**, s. 470–474.
- [141] KOUSSIOS S., BEUKERS A., STATHIS P., *Manufacturability of composite pressure vessels: application of non-geodesic winding*, 16th International conference on composite materials, Kyoto, Japan, 2007.
- [142] KOUSSIOS S., *Influence of the fiber bundle bandwidth on the determination of a winding pattern*, Proceedings of the European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Noordwijk, The Netherlands, 29.11–01.12.2000,

- European Space Agency, Provided by the NASA Astrophysics Data System, 03.2001, s. 375–381.
- [143] KRÓLIKOWSKI W., *Żywnice i laminaty poliestrowe*, WNT, Warszawa, 1986, s. 570–600.
 - [144] KRÓLIKOWSKI W., *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające*, WNT, Warszawa, 1988.
 - [145] KRÓLIKOWSKI W., *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, PWN, Warszawa 2012.
 - [146] LANGKAMP A., *Bruchmodebezogene Versagensmodelle für faser- und textilverstärkte Basisverbunde mit polymeren, keramischen sowie metallischen Matrices*, Von der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur angenommene Dissertation, 2002.
 - [147] LEIFESTE M. R., *Interrelationship of nondestructive evaluation methodologies applied to testing of composite overwrapped pressure vessels*, NASA Johnson Space Center White Sands Test Facility, 2008.
 - [148] LEŚNIAK W., *Samochody od A do Z*, WKŁ, w. 1, Warszawa, 1960, s. 200.
 - [149] LIPSKI W., MAREK W., *Analiza kombinatoryczna*, Biblioteka matematyczna, tom 59, PWN, Warszawa, 1986, s. 68–79.
 - [150] LOMOV S.V., IVANOV D.S., VERPOEST I., ZAKO M., KURASHIKI T., NAKAI H., HIROSAWA S., *Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms*, Composites Science and Technology, **67**, 2007, s. 1870–1891.
 - [151] LOSSIE M., VAN BRUSSEL H., *Design principles in filament winding*, Composites Manufacturing, 1994, **5**, 1, s. 5–13.
 - [152] LUBIN G., *Sprawocznik po kompozycyjnym materiałach*, tom I i II (tłumaczenie z angielskiego: *Handbook of composites*.), Moskwa, 1988.
 - [153] ŁUCZAK M., *Nawijanie elementów rurowych z włókna szklanego ciągłego*, Kryteria teoretyczne, IEL/OW, dokumentacja techniczna nr 97180050269003786, Wrocław, 1980.
 - [154] MALECKI I., RANACHOWSKI J., *Emisja akustyczna*, PAN, Warszawa, 1994, s. 269–289.
 - [155] Strona internetowa firmy Material i zawarty na niej opis programu komercyjnego CADWIND – www.material.be
 - [156] MERTINY P., GOLD A., *Quantification of leakage damage in high-pressure fibre-reinforced polymer composite tubular vessels*, Polymer Testing, 2007, **26**, s. 172–179.
 - [157] MIAN H. H., RAHMAN H., *Influence of mosaic patterns on the structural integrity of filament wound composite pressure vessels*, International Journal of Structural Integrity, 2011, **2**, 3, s. 354–356.
 - [158] MORI T., TANAKA K., *Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions*, Acta Metall., **21**, 1973, s. 571–574.
 - [159] MOROZOV E.V., *The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells*, Composite structures, 2006, **76**, s. 123–129.
 - [160] VASILIEV V.V., MOROZOV E.V., *Advanced Mechanics of composite Materials*, Elsevier, Oxford, ISBN 978-0-08-045372-9, 2007.
 - [161] MUC A., *Analiza stateczności i deformacji kompozytowych dennic zbiorników ciśnieniowych*, monografia 135, Politechnika Krakowska, Kraków, 1992.

- [162] MUC A. *Projektowanie kompozytowych zbiorników ciśnieniowych*, Konferencja Naukowo-Techniczna, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Istebna-Gliwice, 12–14.11.2006, s. 99–104.
- [163] OCHELSKI S., *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych* WNT, Warszawa, 2005.
- [164] PAI S. P., JENSEN D. W., (I) *Influence of fiber undulations on buckling of thin filament-wound cylinders in axial compression*, Journal of Aerospace Engineering, 2001, **1**, 14, s.12–20.
- [165] PAI S. P., JENSEN D. W., (II) *Influence of residual strains on buckling of thin filament-wound cylinders in axial compression*, Journal of Aerospace Engineering, 2001, **1**, 14, s. 21–28.
- [166] PIĄTEK M., *Teoretyczne podstawy nawijania elementów rurowych z włókna ciągłego splotem skrzyżowanym przy użyciu jednej wiązki*, Polimery, 1992, **9**, s. 412–417.
- [167] PURSLOV D., *On the optical assessment of the void content in composite materials*, Composites, 1984, **15**, 3, s. 207–210.
- [168] Raporty z badań prowadzonych przez WSK Świdnik na lekkich kompozytowych butlach lotniczych produkowanych w IEL/OW (szereg badań niszczących z tensometrycznymi pomiarami odkształceń oraz próby na przestrzelenie i długocyklowe próby ciśnieniowe).
- [169] Raport z wykonanego projektu celowego Nr 7T07C 125 2000 C/4884, umowa nr 2832/C.T07-10/2000 z 30.11.2000 r. *Budowa typoszeregu przenośnych, wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych*, tytuł prac badawczo-rozwojowych: *Optymalizacja konstrukcji i technologii oraz opracowanie współczesnych metod badań doświadczalnych wysokociśnieniowych zbiorników z kompozytów polimerowych*, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Politechnika Wrocławska, 10.2002.
- [170] REIFSNIDER K., *Fatigue behaviour of composite materials*, International Journal of Fracture, 1980, **16**, 6, s. 563–583.
- [171] ROSATO D.V., GROVE C.S. *Namotka stekloplastikow*, tłumaczenie z angielskiego: *Filament winding*, Moskwa, 1969.
- [172] 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** s. 1439–1449.
- [173] RUPNOWSKI P., GENTZ M., BENEDIKT B., KUMOSA M., *The Response of a Woven Graphite Fiber/Polyimide Composite to Aging in Nitrogen*, Acta Materialia, 2005, **53** s. 4555–4565.
- [174] RYBACZUK M., STOPPEL P., *Fractal growth of fatigue defects in materials*, International Journal of Fracture, 2000, **103**, s. 71–94.
- [175] RYBACZUK M., ZIELIŃSKI W., *The concept of physical and fractal dimension I. The projective dimensions*, Chaos, Solitons & Fractals, 2001, **12**, s. 2517–2535.
- [176] RYBACZUK M., ZIELIŃSKI W., KĘDZIA A., *The concept of physical and fractal dimension II. The differential calculus in dimensional spaces*, Chaos, Solitons & Fractals, 2001, **12**, s. 2537–2552.
- [177] SANKOWSKA A., BŁĄŻEJEWSKI W., BOŻEK K., *Światłowód włóknisty jako czujnik wyężenia wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych*, Światłowody

- i ich zastosowania. IX Konferencja, Referaty i komunikaty, Krasnobród, Wydawnictwo UMCS, Lublin, 9–11.10.2003, t. 2, s. 736–741.
- [178] SANKOWSKA A., GAŚSIOR P., WIŚNIEWSKI W., BŁAŻEJEWSKI W., *Światłowodowe głowice pomiarowe zintegrowane z konstrukcjami z materiałów kompozytowych*, Światłowodowy i ich zastosowania, X Konferencja, Referaty i komunikaty, Krasnobród, Liber Duo, Lublin, 4–7.10.2006, t. 2, s. 626–631.
 - [179] SANKOWSKA A., GAŚSIOR P., KALETA J., BŁAŻEJEWSKI W., *Optical fiber sensors integrated with composite material based constructions*, Lightguides and Their Applications III, Krasnobród, Poland, 4–7.10.2006 Eds Jan Wójcik, Waldemar Wójcik. Bellingham, Wash. SPIE – The International Society for Optical Engineering, cop. 2007. s. 66081L-1-66081L-10, lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1117/12.739745>
 - [180] SAS J., KWAŚNIEWSKI K., *Gaz ziemny dla pojazdów. Podręcznik dla użytkowników*, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2004.
 - [181] SCHLEDJEWSKI R., *Highly efficient pressure-vessel manufacturing*, JEC Composite Magazine 07.2007, **34** s. 32–34.
 - [182] SCHORN R., Raport cząstkowy projektu INGas – *Application Report NDI of composite pressure vessels by Shearography*, Steinbichler Optotechnik GmbH i BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 12.03.2012.
 - [183] SCHOLLIERS J., VAN BRUSSEL H., *Computer-integrated filament winding: Computer-integrated design, robotic filament winding and robotic quality control*, Composites Manufacturing, 1994, **5**, 1, s. 15–23.
 - [184] SCHULTE K., REESE E., CHOU T.-W., *Fatigue Behaviour and damage development in woven fabric composites*, DFVLR, D 5000 Köln 90, Germany 1986.
 - [185] SELDEN P.H., *Glasfaserverstärkte kunststoffe*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 1967.
 - [186] SODEN P.D., KITCHING R., TSAVALAS Y., HINTON M.J., *Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads*, Composites Science and Technology, 1993, **46**, s. 363–378.
 - [187] SOHI M.M., *Compressive Strength and Modes of Failure in Polymeric Composites*, rozprawa naukowa, EMA Journal Announcement: 9106, Washington University, 1991.
 - [188] SRINIVANSAN R., KARANDIKAR H.M., MISTREE F., *Understanding design-manufacture interaction using compromise decision support problems, I. A formulation for composite pressure vessels*, s. 679–692, *II. Preliminary synthesis of composite pressure vessels*, s. 693–703, *III. Design for manufacture of composite pressure vessels*, s. 705–717, Syst. Design Lab, Houston University, TX., USA, Computers and Structures, 1991, **40**, 3.
 - [189] StorHy – projekt 6 programu ramowego – <http://www.storhy.net/>
 - [190] THESKEN J. C., *A theoretical investigation of composite overwrapped pressure vessel (COPV) mechanics applied to NASA full scale tests*, Proceedings of American Society for Composites - Twentieth Technical Conference, 14.06.2006, 20 stron.
 - [191] TORRES M., CROUZEIX L., DOUCHIN B., COLLOMBET F., HERNÁNDEZ H., GONZÁLEZ J., *Strain field characterization of filament winding pattern at*

- $\pm 55^\circ$ using numerical image correlation, Instituto Politécnico Nacional – México, Université de Toulouse – France, 2009, 10 stron.
- [192] TVERGAARD, V., *Model studies of fibre breakage and debonding in a metal reinforced by short fibres*, Journal of Mechanics and Physics of Solids, **36**(1), 1988, s. 29–58.
 - [193] URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO, *Warunki techniczne dozoru technicznego, Urządzenia ciśnieniowe*, Wydawnictwo Poligraficzne Bydgoszcz, 1991., *Zbiorniki przenośne. Zbiorniki stałe*, Wydawnictwo Prawnicze, Warszawa, 1991.
 - [194] VALENTIN D., BUNSELL A.R., *A study of damage accumulation in carbon fibre reinforced epoxy resin structures during mechanical loading monitored by acoustic emission*, Journal of reinforced plastics and composites, October 1982, s. 314–334.
 - [195] VALENTIN D., BUNSELL A.R., *Damage detection in carbon fibre epoxy structures using acoustic emission*, Composite Structures, 1983, **2**, s. 40–52.
 - [196] WILCZYŃSKI A.P., *Polimerowe kompozyty włókniste*, WNT, Warszawa, 1996.
 - [197] WILCZYŃSKI A.P., *Mechanika Polimerów w praktyce konstrukcyjnej*, WNT, Warszawa, 1984.
 - [198] WILD P.M., VICKERS W.G. *Analysis of Filament – wound Cylindrical shells Under combined Centrifugal, pressure and loading*, Composites, 28A, 1997, s. 47–55.
 - [199] XIONGQIPENG, JIAN CAO, *A dual homogenization and finite element approach for material characterization of textile composites*, Composites: Part **B33**, 2002, s. 45–56.
 - [200] ZAJĄC P., BŁAŻEJEWSKI W., CZULAK A., BOEHM R., *Badania kompozytowych próbek rurowych do oceny własności materiału kompozytowego*, Materiały polimerowe, Pomerania-Plast 2004. Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2–4.06.2004, s. 277–279.
 - [201] ZAJĄC P., BŁAŻEJEWSKI W., *Badania kompozytowych zbiorników paliw gazowych – LPG, CNG i wodór*, Materiały polimerowe, Pomerania-Plast 2004. Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2–4.06.2004, s. 283–285.
 - [202] ZAJĄC P., BŁAŻEJEWSKI W., SANKOWSKA A., *Zintegrowane czujniki optyczne kompozytowych zbiorników wysokociśnieniowych*, Materiały polimerowe, Pomerania – Plast 2004. Streszczenia, Szczecin–Międzyzdroje, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2–4.06.2004, s. 280–282.
 - [203] ZHANG Y., XIA Z., ELLYIN F., *Two-scale analysis of a filament-wound cylindrical structure and application of periodic boundary conditions*, International Journal of Solids and Structures, 2008, **45**, s. 5322–5336.
 - [204] ZHANG Y., YANG F., ZHU A., *Mechanical analysis and reasonable design for Ti-Al alloy liner wound with carbon fiber composite high pressure vessel*, Journal of Zhejiang University SCIENCE A., 2009, **10**, 3, 384–392.
 - [205] ZINDEL D., BAKIS CH. E., *Nonlinear micromechanical Model of filament-wound composites fiber undulation*, Mechanics of Composite Materials, 03.2011, **47**, 1, s. 73–94.

Wykaz norm

- [206] PN-EN ISO 11439: 2003 Butle do gazów – wysokociśnieniowe butle do gazu ziemnego stosowane jako zbiorniki paliwa pojazdów samochodowych (High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles).
- [207] PN-EN 12245: 2002 (U) Butle do gazów – Butle wykonane z kompozytów całkowicie wzmocnionych, (Transportable gas cylinders – Fully wrapped composite cylinders).
- [208] PN-EN 12257: 2002 (U) Butle do gazów – Butle z kompozytów bez szwu wzmocnione obwodowo.
- [209] PN-EN 13923: 2006 (U) Zbiorniki ciśnieniowe pokrywane włóknem szklanym (FRP) – Materiały, projektowanie, wytwarzanie i badanie.
- [210] PN-EN ISO 11114-1: 2001 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli, część 1: Materiały metalowe.
- [211] PN-EN ISO 11114-2: 2002 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli, część 2: Materiały niemetaliczne.
- [212] PN-EN ISO 11114-3: 2001 Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli, część 3: Badanie samozapalenia w atmosferze tlenu.
- [213] PN-EN ISO 11114-4: 2005 (U) Butle do gazów – Zgodność materiału butli i zaworu z gazem zawartym w butli, część 4: Metody badań i selekcji materiałów metalowych na kruchość wodorową.
- [214] ISO 11119-1: 2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods – Part 1: Hoop wrapped composite gas cylinders.
- [215] ISO 11119-2: 2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods-Part 2: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders with load-sharing metal liners.
- [216] ISO 11119-3: 2002 Gas cylinders of composite construction – Specification and test methods-Part 2: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders with non load-sharing metallic or non-metallic liners.
- [217] PN-EN ISO 11623: 2002(U) Butle do gazów – okresowa kontrola i badania butli do gazów wykonanych z kompozytów.
- [218] Addendum 109: Regulation No. 110, Rev. 2., E/ECE/324., E/ECE/TRANS/505., Porozumienie dotyczące przyjęcia jednolitych przepisów technicznych dla pojazdów kołowych, wyposażenia i części, 2003. Uzupełnienie załącznika 109: Regulation No. 110, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, z dnia 14.03.2008, L 72/113, dodatek A, B, C, D, E, F, G.
- [219] ISO/DIS 15869: 2004, Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land vehicle fuel tanks.
- [220] ISO/NP 15399: H2 gas-cylinder/tube for stationary storage, norma jest włączona do nowej ISO/TC 197, grupa robocza WG15.
- [221] Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, GRPE Informal Group: Hydrogen/Fuel Cell Vehicles, 2003, oraz Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, Revision 12b.
- [222] CHERFAOUI M., HERVE CETIM C., THIAM S.N.E.A.(P), X. DUFOUR S.B.P.I., *Développement de méthodes de contrôle des structures composites*, Composites, 01-02.1989, 1.

- [223] ASTM D 2290-64 T *Tentative Method of Test for: Apparent tensile strength of parallel reinforced plastics by split disk method*, s. 465–470.
- [224] Materiały reklamowe firmy LUXFER, z wypisem norm: brytyjskiej BS5045, HSE-AL-FW2, oraz wymagań niemieckich RW TUV i szwajcarskich SVDB, 1997.
- [225] ASTM D 2585-68 *Standard Test Method for Preparation and tension testing of filament – wound pressure vessels*, April 1990, s. 106–110.
- [226] ASTM E 1118-86 *Standard Practice for AE Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP)*, s. 710–724.
- [227] ASTM E 1067-85 *Standard Practice for AE Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels*, s. 660-679.
- [228] PN-EN ISO 1172 *Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem szklanym, preimpregnaty, tłoczywa i laminaty. Oznaczanie zawartości włókna szklanego i napelnacza mineralnego. Metody kalcynowania*, PKN, Warszawa, 11.2002.
- [229] ASTM D 2992-91 *Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings*.
- [230] NFT57900, BS4994 – BIELZOWSKI A., *O praktycznych aspektach badań nad kinetyką rozwoju pęknięć poprzecznych w kompozytach warstwowych*, I Konferencja – Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Kozubnik, 25–27.10.1995.

Wykaz pojęć, terminów angielskich i skrótów

Architektura wzoru – termin jak w literaturze anglosaskiej (ang. *pattern architecture* [122] – por. **wzór mozaikowy**).

Braided fabric composites – ang. kompozyt wzmocniony wyplotem (np. szklanym), plecionka (wytworzona przez wyplatanie, rękaw, koszulka); inne bliskie pojęcia to *woven* – tkanina (płaska), *knitted* – dzianina (wyrób przestrzenny, np. trójnik).

Butla – jednoprzestrzeniowy zbiornik nieizolowany o pojemności nieprzekraczającej 150 dm³ [193]. Według autora pojęcie butli określa także kształt walcowy oraz dotyczy objętości znacznie większych niż 150 dm³, np. normy [206, 218, 221] i inne zamieszczone w spisie norm (por. s. 162), które tematycznie obejmują butle (zbiorniki) o objętości 20–1000 litrów. Spotykane pojęcia równoznaczne to zbiornik oraz cylinder, kontener (wolne tłumaczenie z ang.).

CDS – ang. *characteristic damage state* – charakterystyczny stan uszkodzenia – [170].

CH₂ – ang. *Compressed Hydrogen* – sprężony wodór.

Ciągnięcie – **przeciąganie**.

CNG – ang. *Compressed Natural Gas* – sprężony gaz ziemny.

COPV – ang. *Composite Overlapped Pressure Vessels* – kompozytowe zbiorniki ciśnieniowe z pełnym oplotem (typu 3 i 4).

Cross-over – ang. skrzyżowania wiązek w czasie nawijania pod kątem $\pm\alpha$.

Dennica – zakończenie części walcowej butli, zbiornika, cylindra, najczęściej sferyczne, elipsoidalne lub torisferyczne (koszykowe) [161], izotensoidalne wynikające ze wzmocnienia nawijanego (por. pkt 4.2.4).

EA – emisja akustyczna; w badaniach przedstawionych w pracy wykorzystywano aparaturę AMS3 firmy Vallen omówioną w [28].

EMWP – elastooptyczna metoda warstwy powierzchniowej.

ES – kompozyt epoksydowo-szklany.

EW – kompozyt epoksydowo-węglowy.

FBG – światłowodowe siatki Bragga, ŚSB (ang. *fiber Bragg gratings*).

Gelcoat – ang., warstwa ochronna żywicy z wypełniaczem, elastyczna, szczelna itp., bez wzmocnienia [161].

- Grupa wzorów mozaikowych** – cztery wzory z tablicy charakteryzujące się tym samym widokiem jakościowym, liczbą przeplotów, lecz innymi współczynnikami skoku nawijania a długością nawijania (por. 4.2.3 i rys. 4.10).
- Izotensoida** – krzywa zapewniająca stałe wyężenie dennicy wzmocnionej włóknem ciągłym naniesionym w procesie nawijania (w ujęciu technologicznym na nawrotach wiązki bardziej wzmacniają zbiornik, ponieważ jest ich tam więcej; ma to wpływ na zmianę kształtu dennicy na bardziej płaski, z zachowaniem równomiernych naprężeń w ścianie dennicy). W Internecie są dostępne oprogramowania do wyznaczania zarysu izotensoid (por. pkt. 4.2.4).
- Kąt okrażania** – kąt zahaczania, obrót rdzenia lub nawijanego zbiornika w celu umiejscowienia wiązki na dennicy lub zahaczenia na tzw. jeżu na końcach nawijanego elementu.
- Kinking** – ang. mikromechanizm zniszczenia kompozytu włóknistego, polegający na wyboczeniu włókien ściskanych z utworzeniem uskoku (por. „rury skręcane” s. 85), [187].
- Klasyczna teoria laminatu** – metoda uwzględniania właściwości indywidualnych warstw tworzących materiał kompozytowy i pozwalająca na tej podstawie opisać właściwości tego warstwowego materiału kompozytowego.
- Knitted fabric composites** – ang., kompozyt wzmocniony dzianiną, np. z włókna szklanego (wyrób przestrzenny, np. trójkąt). Inne bliskie pojęcia to: *woven* – tkanina (płaska), *braided* – plecionka, wyplot (wytworzony przez wyplatanie, rękaw, koszulka – por. rys. 3.2).
- Kompozyt wzmocniony włóknem ciągłym** – kompozyt wykonany z włókna ciągłego odwijanego z bobin rowingowych, np. metodą nawijania lub przeciągania, pultruzji (por. rys. 3.2).
- Laminat** – wielowarstwowy materiał kompozytowy układany ręcznie lub maszynowo z użyciem żywic wzmacnianych tkaniną, matą itp.
- LCM** – ang., *liquid composite moulding* ogólna grupa technik infuzyjnych, w tym RTM, do wytwarzania kompozytów włóknistych przez wtłaczanie żywicy do zamkniętej formy, w której znajduje się wzmocnienie.
- Liner** – ang., wewnętrzna dętka butli kompozytowej, spełniająca rolę rdzenia w czasie nawijania oraz zapewniająca szczelność gazu zmagazynowanego wewnątrz butli kompozytowej; liner wykonuje się z metalu, tworzywa sztucznego (np. polipropylen, polietylen, nylon, guma itp.); wykładzina wewnętrzna (w dużych zbiornikach [161]).
- Linia przeplotów i linia uskoków** – obszary sfalowania obwodowego – ang. *circumferential undulation zone*, obszary sfalowania śrubowego, ang. *helical undulation zone* [122] (por. rys. 4.23).
- NOL** – ang. *Naval Ordnance Laboratory*, metoda badania opracowana w latach pięćdziesiątych XX w. przez Laboratorium Marynarki Wojennej USA, określająca wytrzymałości jednokierunkowego kompozytu włóknistego, wyko-

nanego w postaci pierścieni osadzonych na specjalnym uchwycie, oprzyrządowaniu [16, 70, 223].

Nawijanie obwodowe – kąt nawijania $\alpha \approx 90^\circ$, skok $s = e$, współczynnik $a = 0$ lub $a = 0,5$ lub $a = 1$ dla wszystkich tablic wzorów mozaikowych, ang. *hoop winding, hoop wrapped*.

Nawijarka – urządzenie podobne do tokarki, służące do wykonywania elementów kompozytowych metodą nawijania (rys. 4.1, 5.21).

Nawój – krzyżowy obwodowy i wzdłużny, ale nie musi być wzorem mozaikowym.

Pasmo – np. rowingu szklanego, składające się zwykle z 204 włókienek elementarnych bez skreću (najczęściej spotyka się rowingi 30, 60, 120, 240 itd. pasmowe).

Photoelastic coating technique – ang., elastooptyczna metoda warstwy powierzchniowej (EMWP).

Preparacja – pokrycie, film, wykończenie, szlichta – pojęcia zbliżone, dotyczą cienkiej warstwy, ok. $0,5\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$, na powierzchni włókna wzmacniającego, polepszając np. zwilżalność włókna szklanego syciwem epoksydowym, proadhezynność, antystatyczność, szlichty włókiennicze itp. (ochronne, zmniejszające tarcie) [139, 143–145]

Preimpregnat – ang. *pregreg*, materiał włóknisty (rowing, tkanina itp.) nasączony żywicą w odpowiedniej ilości do techniki przetwórczej, o określonym czasie użycia; materiał utwardza się po podgrzaniu do określonej temperatury – na ogół przy $80\text{ }^\circ\text{C}$, nawet do $140\text{ }^\circ\text{C}$.

Przeciąganie – ciągnienie, ang. *pulltrusion*, ciągły i zautomatyzowany proces wytwarzania prętów i profili jednokierunkowych – z włóknami ułożonymi wzdłuż kierunku ciągnienia (rys. 3.2); proces może być rozszerzony o nawijanie – nawijanie z przeciąganiem – ang. *pullwinding*.

Przeplot – układanie wiązek rowingu w czasie nawijania, dające w efekcie widok tzw. splotu koszykowego (rys. 4.12, 4.21); ang. – *interweaving* (ang. *fibre crossovers* – przejście wiązki jednej nad drugą, *fibre undulations* – sfalowanie włókna na przeplotcie w przekroju pionowym lub przy braku naciągu, *overlaps* – zakładki w przeplotach).

Przeprężanie – ang. *autofrettage* – technika obróbki metali stosowana głównie w celu zwiększenia nośności cylindrów ciśnieniowych, luf armatnich, instalacji silników wysokoprężnych, w niniejszej pracy chodzi o wprowadzanie nieznaczego odkształcenia plastycznego w linerze metalowym w celu zmniejszenia w nim naprężeń przy ciśnieniu pracy (pkt 2.4, rys. 2.3).

Punkt centralny – punkt skrzyżowania linii przeplotów i uskołu (por. rys. 4.23).

Pustki – ang. *voids* – puste miejsca w materiale kompozytowym, pęcherzyki powietrza, uważane są jako wada materiałowa [10, 77, 83, 167].

Rdzeń – najczęściej walcowy, odtwarzający wnętrze kompozytowego elementu nawijanego, np. rury.

- RMS** – ang. *root mean square* – średnia wartość napięcia skutecznego w metodzie EA – wielkość energii niesionej przez szum. Wartość zmiennej wyznaczana jest jedynie między zdarzeniami akustycznymi (w czasie „ciszy”), wyliczana jest na podstawie napięcia na wejściu przedwzmacniacza i podawana w [μV] proporcjonalnych do amplitudy – 0 dB = 1 μV , 20 dB = 10 μV , 40 dB = 100 μV itd.
- Rowing** – np. szklany, składający się z pasm zawierających zwykle 204 szklane włókienka elementarne bez skrętu; do nawijania najlepszy jest rowing trx 1200 g/km. Rowing tex 2400 g/km może nie ulec przesyceniu, podobnie jest z włóknem węglowym.
- RTM** – ang. *resin transfer moulding* – metoda z grupy technik infuzyjnych do wytwarzania elementów z włóknistych materiałów kompozytowych z użyciem szczelnej formy dwuczęściowej wypełnionej wzmocnieniem, do której wtłaczana jest kompozycja żywiczna po uprzednim podłączeniu podciśnienia.
- RVE** – ang. *representative volume element* – komórka reprezentatywna w modelowaniu metodą homogenizacji.
- Sfalowanie** – ang. *undulation* [122], efekt powstały na powierzchni przepłotu, przepłot.
- Splitting** – ang., pęknięcia osnowy rozchodzące się wzdłuż włókien.
- ŚSB** – światłowodowe siatki Bragga, ang. FBG (*fibre Bragg greetings*).
- Struktura nawijania** – budowa całej ścianki butli kompozytowej, w której znajduje się wiele warstw. Kolejne warstwy struktury mogą być wzdłużne, obwodowe oraz krzyżowe. W grupie warstw krzyżowych znajdują się warstwy z wzorami mozaikowymi. Najczęściej warstwy o pewnym kącie nawijania złożone są z kilku warstw o tym samym wzorze mozaikowym. Struktura jest pojęciem szerszym od wzoru mozaikowego, omówiono w punkcie 1.2; struktura to także budowa ścianki butli wykonywanych innymi technikami niż metoda nawijania [161].
- Szerografia** – ang. *shearography* od słowa *shear* – ścinanie [82], nieniszcząca i interferencyjna metoda badawcza, dzięki której można rozpoznawać uszkodzenia lub wady wewnętrzne elementów poddanych obciążeniu; umożliwia pomiar gradientu przemieszczenia, a nie samego przemieszczenia, co występuje w przypadku innych metod optycznych, jak ESPI czy holografia (por. pkt 6.9 oraz pkt 5.1).
- Tex** – współczynnik charakteryzujący tzw. gramaturę rowingu [g/km].
- Tow** – ang., wiązka kilku lub jednego rowingu szklanego lub innego włókna wzmacniającego.
- Typ zbiorników** – termin zdefiniowany w normach, np. [206, 218, 221] i innych (por. rys. 2.1 oraz tab. 2.2); jako najbardziej innowacyjny uważa się typ 4, który jest nazywany w literaturze przedmiotu typem butli nowej generacji.

Void – ang., pustki w materiale kompozytowym (wada materiału) powstałe w wyniku spienienia się żywicy, tworzenia kieszeni powietrznych w czasie nawijania itd.

Warstwa – obwodowa (względem osi nawijania), wzdłużna lub krzyżowa, mająca swój wzór mozaikowy, który pokrył równomiernie rdzeń, o zadanej szerokości wiązki, np. rowingu szklanego, tworząc równomierną sieć – w tak powstałej sieci wiązki równoległe stykają się ze sobą (lub nakładają się z jednakową zakładką) i w każdym punkcie na powierzchni rdzenia znajdują się tylko dwie (górna i dolna, zorientowane pod kątem $+\alpha$ i $-\alpha$) (rys. 4.21).

Wiązka – ang. *tow*, np. kilku lub jednego rowingu szklanego składająca się z pasm (najczęściej spotyka się rowingi 30, 60, 120, 240 itd. pasm w wiązce).

Włókno ciągłe – nieskończenie długa wiązka rowingu, np. szklanego.

Woven fabric composites – ang., kompozyt wzmocniony tkaniną, np. z włókna szklanego (powierzchnia płaska). Inne bliskie pojęcia to: *knitted* – dzianina (wyrób przestrzenny, np. trójkąt), *braided* – plecionka, wyplot (wytworzony przez wyplatanie, rękaw, koszulka (por. rys. 3.2).

Współczynnik reszty skoku nawijania – a_i – określa drogę ruchu suportu nawijarki jako $l = k \cdot s + a_i \cdot s$ [mm], decydujący przy uzyskiwaniu wzorów mozaikowych.

Wytrzymałość właściwa – stosunek wytrzymałości na rozciąganie kompozytu do jego gęstości – $W = W_r/\rho$, [196].

Wzór mozaikowy – ang. *mosaic patterns*, ułożenia wiązek włókna w czasie nawijania krzyżowego, składający się z charakterystycznych rombów, trójkątów [157]. Inne równoznaczne pojęcia spotykane w literaturze anglosaskiej: *pattern architecture* [122], *winding architecture* [122], *mosaic-shaped patterns* [157, 159, 160], *diamond patterns* [164, 165], *diamond shaped* [157], *triangular repeating mosaic* [157, 159, 160], *triangular shaped mosaic patterns* [157, 159, 160], *triangular mosaic units* [159, 160], *rhombic-shaped patterns* [205].

Composite pressure vessels reinforced with fibers according to mosaic patterns

The object of this work were composite materials reinforced with continuous fibre, manufactured by filament winding technology according to different mosaic patterns, intended as a structural walls of composite high-pressure vessels. During the winding of composite vessels, in their helical layers emerge distinctive mosaic patterns composed of lozenges and triangles outlined by fibre crossovers arranged along lines. Differences between mosaic patterns emerge solely from the size and number of lozenges and the number of crossovers connected with them. The rest of the winding parameters pertaining to reinforcement (winding angle, tow dimensions, wall thickness) remain the same. If the crossovers are treated as flaws, their number and arrangement impacts the initiation and propagation of cracks in the material under load, as well as its ultimate strength. The work contains a description of problems connected to usage of compressed gaseous fuels in wheeled transport, operating parameters, including safety aspects and requirements laid down by existing standards. Vessel constructions present on the market, especially of composite vessels intended for storage of highly-compressed gaseous fuels such as CNG and CH₂, were characterized. Methods for manufacture of composite materials reinforced with continuous fibres were discussed, with a special attention paid to analysis of filament winding technology and mosaic pattern emergence during winding. An analysis of the structure of the reinforcement of structural walls of existing commercial vessels was performed. Results of this analysis allow to state, that the structure of reinforcement – considering the mosaic patterns – in helical layers of vessels is selected randomly. The designing process of reinforcement of the composite material of the vessel according to mosaic patterns was explained through the analysis of the geometry of winding using original matrix method. The presented matrix method was compared to other methods used by the industry, for example with CADWIND software. Original solution to reinforcement lay up in winded composite material was proposed, consisting of the application of so-called double-layered patterns and alternating winding of layers according to selected mosaic patterns. A literature review on the subject was performed, containing the results of research and analyses of pipes produced by filament winding method, laid up according to winding patterns. Cited and discussed were

especially papers containing results of studies on composite cylindrical elements for pressure applications (pipelines, tanks etc.). The results of published works on this subject by the author were also cited and used for further analysis.

In the experimental part of the work, composite vessels reinforced according to eight different mosaic patterns were tested. The tests comprised of comparative pressure tests – both static and fatigue – of produced vessels. Moreover, the composite material of vessel walls was analysed. In the study, diverse research techniques were used, such as acoustic emission, thermovision, fibre Bragg gratings as strain sensors, elasto-optical surface layer method, shearography, displacement measurement using structural light scanner and others. Obtained results, especially of the fatigue tests of the vessels, allowed categorization of tested mosaic patterns of the fibrous reinforcement according to number of fibre crossovers.

In the last part of the work, a computational model have been proposed. The model uses an FEM and subsequent homogenization for establishing effective properties of the fibre strand. A model using such mathematical tools as fractals and cellular automata have also been proposed. In the conclusion, the arguments backed by obtained results were presented, evidencing the hypothesis, that composite pipes and vessels strength is dependent on crossovers present in the structure, arranged in mosaic patterns. The analysis of winding geometry connected to mosaic patterns, performed using the matrix method, allows to predict the quality of the construction dependent on density and arrangement of crossovers. The performed tests confirm which construction should be selected for application.

W książce przedstawiono obszerny materiał eksperymentalny dotyczący wytwarzania oraz badań struktur i właściwości kompozytowych obiektów rurowych i zbiorników wysokociśnieniowych (butli) produkowanych technologią nawijania wzmacniającego włókna ciągłego. Opracowanie jest oparte na oryginalnych badaniach, w dużej mierze opisanych w wielu publikacjach. Kompozytowe nawijane wyroby rurowe i butle przeznaczone do różnych warunków eksploatacyjnych są wytwarzane przez wiele światowych firm według własnych technologii. Zbiorniki wysokociśnieniowe mają różne struktury nawoju kompozytowego i różne właściwości.

Autor opracował i zaprezentował w publikacji oryginalną metodę tablicową umożliwiającą wytwarzanie i wybór wzoru mozaikowego, który powstanie w procesie nawijania włókna pod kątem $\pm\alpha$ (nawijanie krzyżowe). Wzory mozaikowe charakteryzują się zmienną liczbą przepłotów (stanowiących defekt materiałowy) ułożonych w linie o zmiennych długościach. W oparciu o metodę tablicową autor wytworzył nawijane elementy rurowe i zbiorniki ciśnieniowe, a następnie zbadał ich właściwości statyczne i dynamiczne przy wysokich obciążeniach cyklicznych. Zastosował także różne nowoczesne metody badań, szczególnie nieniszczące, takie jak: emisja akustyczna, szerografia, interferometryczna metoda warstwy powierzchniowej, termografia, mikroskopia optyczna, metoda przemieszczeń z użyciem skanera światła strukturalnego, pomiar odkształceń z wykorzystaniem światłowodowych siatek Bragga i innych typów czujników światłowodowych oraz znormalizowane metody badań właściwości mechanicznych. Analiza uzyskanych wyników umożliwiła wybranie optymalnych wzorów mozaikowych dla wyrobów kompozytowych wytworzonych metodą nawijania włókna ciągłego z uwzględnieniem przewidywanych warunków pracy, na przykład zbiorniki wysokociśnieniowe poddane ciśnieniu wewnętrznemu, rury nawijane poddawane zginaniu (maszty) lub skręcaniu (wały). W pracy zaprezentowano modele obliczeniowe wykorzystujące MES, analizę fraktalną oraz automaty komórkowe i uwzględniono w tych modelach zależności związane z liczbą i rozmieszczeniem przepłotów we wzorze mozaikowym. Przeprowadzone przez autora wnikliwe badania umożliwiły wskazanie miejsc inicjacji i rozwoju uszkodzeń w zależności od wzoru mozaikowego.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni,
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-777-1