



**Praca doktorska – streszczenie**

**DURABILITY EVALUATION OF TEXTILE HANGING  
ROOFS MATERIALS**

***(OCENA TRWAŁOŚCI MATERIAŁÓW TEKSTYLNYCH  
DLA PRZEKRYĆ WISZĄCYCH)***

**Krzysztof Żerdzicki**

**Promotorzy:**

**Paweł Kłosowski, Profesor**

Politechnika Gdańska

**Krzysztof Woźnica, Profesor**

INSA Bourges

**Gdańsk 2015**

# 1 Wstęp

## 1.1 Wprowadzenie

Głównym problemem rozważanym w prezentowanej pracy jest ocena procesu starzenia oraz trwałości tkanin technicznych (architektonicznych) używanych powszechnie jako materiałów konstrukcyjno-osłonowych w konstrukcjach inżynierskich. Tkaniny architektoniczne zrewolucjonizowały sposób konstruowania przekryć dachowych. Tkaniny te zaczęto stosować do zadaszania obiektów publicznych np. w centrach handlowych, na lotniskach czy stadionach. Z wymogu zapewnienia bezpieczeństwa ludziom wynika konieczność przewidywania zachowania się materiałów dachowych już na etapie projektowania. Aby tego dokonać konieczne jest przeprowadzanie badań starzenia lub przyspieszonego starzenia materiałów używanych do realizacji konstrukcji. Prezentowana praca zawiera analizę zmian właściwości mechanicznych w tkaninach technicznych poddanych starzeniu eksploatacyjnemu (środowiskowemu) oraz w warunkach laboratoryjnych. Wpływ procesu starzenia został przedstawiony w formie zmian wartości parametrów następujących praw konstytutywnych: modelu odcinkowo-liniowego, lepkosprężystego modelu Burgersa oraz lepkoplastycznego modelu Bodnera-Partoma. Większą uwagę poświęcono prawu Bodnera-Partoma, które umożliwia wykonanie analizy konstrukcji wiszących poddanych ekstremalnym warunkom obciążeniowym. Przeprowadzone w pracy analizy dla różnych modeli i podejść uzupełnione weryfikacją uzyskanych rezultatów dają pole do dyskusji i wyciągnięcia wniosków końcowych.

## 1.2 Cel i zakres

Główny cel przedstawionej pracy można zawrzeć w następującej tezie:

*Proces starzenia wpływa na wartości parametrów praw konstytutywnych zidentyfikowanych dla poliestrowych, powleczonych PVC tkanin technicznych.*

W prezentowanej pracy przyjęto następujące etapy badań:

- Przegląd literatury dotyczącej zagadnienia starzenia materiałów budowlanych ze szczególnym uwzględnieniem kompozytowych materiałów polimerowych, do których należą analizowane tkaniny techniczne.
- Przegląd badań laboratoryjnych stosowanych dla tkanin technicznych oraz metody modelowania konstytutywnego tkanin.
- Opracowanie i przeprowadzenie symulacji przyspieszonego starzenia w warunkach laboratoryjnych
- Stworzenie i zrealizowanie programu badań eksperymentalnych próbek poddanych starzeniu naturalnemu oraz przyspieszonemu.

- Przeprowadzenie identyfikacji stałych materiałowych dla założonych modeli konstytutywnych oraz weryfikacja uzyskanych wielkości.
- Zestawienie i porównanie wyników uzyskanych dla różnych metod starzenia. Ocena wpływu starzenia na wartości stałych materiałowych.
- Dyskusja uzyskanych rozwiązań oraz wnioski końcowe.

### **1.3 Membranowe przekrycia wiszące**

W rozdziale tym zaprezentowano specyfikę konstrukcji zwanych przekryciami wiszącymi oraz przedstawiono kilka ich zastosowań oraz najświetniejszych realizacji. Sformułowanie „przekrycia wiszące” zostało wprowadzone przez niemieckiego inżyniera F. Otto [184]. Oznacza ono membranę rozciągniętą pomiędzy nieruchomymi podporami, która pracuje jednocześnie jako element nośny konstrukcji oraz jej pokrycie. Funkcjonalność tych struktur polega na możliwości zadaszenia dużych powierzchni przy stosunkowo małej liczbie podpór. Wśród konstrukcji membranowych rozróżniamy konstrukcje pneumatyczne oraz ciężkowe. Konstrukcje te charakteryzują się geometryczną nieliniowością, a przy zastosowaniu tkanin technicznych także nieliniowością materiałową. Nie mniej, konstrukcje wiszące są chętnie stosowane przez architektów, gdyż dają ogromne możliwości różnorodnego kształtowania powierzchni dachu.

Drugą część rozdziału stanowi prezentacja obiektu Opery Leśnej w Sopotcie. Jest to amfiteatr, który swoją historią sięga początku XX wieku. W latach 2010-2012 przeprowadzono rekonstrukcję całego obiektu wraz z nową konstrukcją wiszącą dachu. Konstrukcja ta została także wyposażona w monitoring śledzący przemieszczenia newralgicznych punktów przekrycia. Potrzeba komputerowej symulacji przyszłego zachowania się nowej konstrukcji oraz fakt uzyskania przez autora dostępu do materiału pokrycia poprzedniego dachu Opery Leśnej stanowił motywację do podjęcia w niniejszej pracy problemu starzenia tkanin technicznych.

## **2 Tkaniny techniczne**

### **2.1 Budowa tkanin technicznych**

Tkaniny techniczne należą do materiałów kompozytowych, gdzie nośność zapewniona jest przez siatkę splecionych bądź tkanych ze sobą nici, a stabilność, wytrzymałość na ścinanie i nieprześlakliwość są zagwarantowane przez materiał obustronnie powlekający tę siatkę. Wśród tkanin plecionych zwykle wyróżnia się dwa główne kierunki nici, kierunek osnowy i wątku. Nici kierunku osnowy są często wstępnie napinane w procesie produkcji tkaniny, w przypadku wątku z reguły tak nie jest. To właśnie ta złożona struktura siatki wzmacniającej wraz z

pokryciem (zwykle wykonanym z innego materiału) wpływa na nieliniowe zachowanie się materiału pod przyłożonym obciążeniem.

## **2.2 Modele numeryczne tkanin technicznych**

Modelowanie struktury tkanin technicznych może odbywać się na 3 poziomach dokładności. Do obliczeń dużych konstrukcji inżynierskich, takich jak powierzchnie dachowe, homogenizacja zachowania się struktury z jednoczesnym uwzględnieniem charakteru pracy siatki jest podejściem optymalnym.

Jednym z modeli tego typu jest model sieci gęstej opracowany przez Branickiego i rozwijany w latach późniejszych przez Branickiego, Kłosowskiego i Ambroziaka. Wszelkie wzory i wyprowadzenia matematyczne tego modelu stanowią główną część aktualnego rozdziału. Model sieci gęstej zakłada, że siły rozciągające działają wzdłuż kierunku danej rodziny nici oraz, że siły w danej rodzinie nici (osnowie, wątku) zależą tylko od odkształceń w kierunku tej rodziny. Dodatkowo w obliczeniach, jest uwzględniana zmiana kąta między rodzinami nici podczas deformacji. Wpływ powleczenia materiału na pracę całej tkaniny może być również wzięty pod uwagę w rozszerzonej wersji modelu. W modelu sieci gęstej zastosować można różnego typu związki konstytutywne, od prostych związków liniowych do wieloparametrowych nieliniowych związków np. lepkoplastycznych ustalonych na podstawie badań jednoosiowych niezależnie dla kierunku osnowy i wątku.

## **2.3 Badania laboratoryjne**

Badania eksperymentalne przeprowadzane są w celu lepszego zrozumienia charakteru pracy tkanin technicznych pod różnego typu obciążeniami oraz w celu oceny odporności na warunki środowiskowe, w których stosowane są zwykle przekrycia dachowe. Omówione zostały następujące badania wytrzymałościowe: jednoosiowe i dwuosiowe testy rozciągania, badanie ścinania, badania rozdierania, badania połączeń klejonych oraz szytych pomiędzy arkuszami tkaniny. Opis zawiera przykładowe zdjęcia z laboratoriów, wyniki z prób oraz odwołania do norm regulujących poszczególne testy. Dodatkowo dla tkanin architektonicznych sprawdza się ich odporność na elastyczne zginanie, udarność pod wpływem uderzenia gradu (ang. impact velocity albo dynamic puncture), nasiąkliwość, niezmienność kształtu (ang. dimensional stability). Osobną grupę badań tworzą testy w kierunku zmiany koloru tkaniny, odporności na działanie promieni słonecznych czy podatności na wzrost mikroorganizmów.

## 2.4 Podsumowanie

W rozdziale tym zaprezentowano tkaniny techniczne. Należą one do kompozytów polimerowych. Zbudowane są z warstwy wzmacniającej w postaci splecionych nici osnowy i wątku oraz z obustronnego powleczenia. Spośród wielu modeli opisujących pracę tkanin technicznych szczególną uwagę poświęcono modelowi sieci gęstej, dla którego stosować można związki konstytutywne ustalane na podstawie badań jednoosiowych. Zaprezentowano także przekrojowo badania laboratoryjne najczęściej stosowane dla tkanin technicznych.

## 3 Podstawy teoretyczne

### 3.1 Trwałość i starzenie materiałów budowlanych

Celem pracy jest ocena trwałości materiałów tekstylnych. Trwałość jest ściśle powiązana z zagadnieniami starzenia i niezawodności. Ostatnimi czasy wiele uwagi w inżynierii budowlanej poświęca się także kwestiom zrównoważonego rozwoju i powiązanego z nim recyklingu stosowanych materiałów. Do oceny trwałości stosuje się różnego typu badania starzenia, wśród których wyróżniamy starzenie naturalne, przyspieszone naturalne oraz przyspieszone laboratoryjne (sztuczne). Najważniejszym zagadnieniem podczas planowania sztucznego starzenia jest jak najlepsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków pracy materiału w symulacjach laboratoryjnych. Najściślejszą dotychczas metodą jest stosowanie komór klimatycznych, które pozwalają uzyskać konkretne wartości wilgotności, temperatury, a nawet promieniowania świetlnego (słonecznego). Z drugiej strony najbardziej rozpowszechnioną metodą przyspieszonego starzenia jest utrzymywanie próbek w podwyższonej temperaturze w specjalnych piekarnikach. Zgodnie z badaniami Arrheniusa, podwyższenie temperatury przyspiesza wiele procesów chemicznych, prowadząc do szybszej degradacji materiału, na którą w warunkach naturalnych czekać by trzeba wiele lat. To właśnie ta metoda oraz analityczne teorie Arrheniusa stanowią podstawę oceny trwałości tkanin technicznych zastosowanej w prezentowanej pracy.

### 3.2 Starzenie materiałów polimerowych

Starzenie możemy ogólnie podzielić na trzy następujące typy: fizyczne, chemiczne i mechaniczne. Starzenie fizyczne jest specyficzną cechą tylko polimerów. Jest bezpośrednio związane z graniczną temperaturą  $T_g$  (temperatura zeszklenia), przy której polimer zmienia swój stan ze szklanego w wysokoelastyczny (ang. rubber). Poniżej tej temperatury, ruchy międzycząsteczkowe Browna są zredukowane, a zmiana wielkości termodynamicznych (objętość, entropia, entalpia) nie jest proporcjonalna do zmian temperatury. Uogólniając, starzenie fizyczne występuje, gdy polimer nie znajduje się w stanie równowagi

termodynamicznej, a polega na zmianach chemicznych mających na celu ustalenie tego stanu (Fig. 3.8). Starzenie fizyczne jest bardzo często spotykane podczas termoplastycznego procesu produkcji polimerów, w tym kompozytów. Zwykle polega na podgrzaniu masy polimerowej, nadaniu jej kształtu (poprzez np. technikę wstrzykiwania, powlekania czy ekstruzji), a następnie szybkim ochłodzeniu do temperatury otoczenia. Tym samym zostaje zainicjowany proces starzenia fizycznego. Zjawisko starzenia fizycznego jest procesem termicznie odwracalnym, co oznacza, że podgrzanie materiału powyżej temperatury zeszklenia usuwa wyniki powstałego wcześniej starzenia ustalając równowagę termodynamiczną układu.

Starzenie chemiczne z kolei nie jest procesem odwracalnym. Polega na trwałej zmianie struktury chemicznej materiału i dla polimerów jest podzielone na depolimeryzację, destrukcję i degradację.

Starzenie mechaniczne jest spowodowane naprężeniami występującymi w materiale, które spowodowane są nadmiernymi obciążeniami. Wszelkiego rodzaju imperfekcje oraz anizotropia w strukturze materiału sprzyjają propagacji starzenia mechanicznego objawiającego się delaminacją, powstawaniem mikropęknięć czy zrywaniem włókien materiału.

Wszystkie omówione typy starzenia wpływają na siebie nawzajem i często przyspieszają ogólnie pojęte starzenie materiału. Dla przykładu, w wyniku starzenia chemicznego następować może zmiana gęstości właściwej materiału, co z kolei wpływa na wielkość granicznej temperatury zeszklenia, która warunkuje występowanie starzenia fizycznego.

Do opisu procesów przyspieszonego starzenia stosować można wiele podejść. Dla polimerów najczęściej spotykanymi są zasada superpozycji czasowo-temperaturowej, superpozycji czasu-czasu starzenia oraz superpozycji czasu-temperatury-czasu starzenia. Wszelkie niezbędne przekształcenia oraz wzory dotyczące tych zasad zostały omówione w pracy. W tej dziedzinie na szczególną uwagę zasługują prace Struik'a [226], który badający polimery krystaliczne i amorficzne przyczynił się do rozwoju powyższych metod, a jego prace do dziś stanowią podstawę analizy starzenia polimerów.

W ostatniej części tego rozdziału zaprezentowano przegląd literatury dotyczącej dotychczasowych osiągnięć i badań w dziedzinie starzenia materiałów polimerowych stosowanych w inżynierii budowlanej. Wśród nich na szczególną uwagę zasługują prace podejmujące próby oceny trwałości materiałów dachowych, w tym tkanin technicznych. Wnioski płynące z przeprowadzonych badań sugerują, że kompozytowe tkaniny architektoniczne przez wiele lat użytkowania zachowują swoje dobre właściwości mechaniczne oraz fizyko-chemiczne. Zauważyć jednak trzeba, że prezentowane prace ograniczają się do badania podstawowych parametrów wytrzymałościowych, takich jak moduł Young'a, wydłużenie przy zerwaniu czy wytrzymałość na zerwanie.

### **3.3 Podsumowanie**

W bieżącym rozdziale omówiono zagadnienie starzenia materiałów budowlanych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów polimerowych. Opisano podstawowe definicje oraz procesy związane z trwałością tworzyw. Zaprezentowano także podejście eksperymentalne i sposoby matematycznego opisu procesu starzenia. Na koniec, zawarto przegląd literatury dotyczącej starzenia materiałów polimerowych, w tym tkanin technicznych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury i metod, postanowiono w prezentowanej analizie trwałości materiałów tekstylnych zastosować metodę starzenia termicznego oraz jej opis zaproponowany przez Arrheniusa.

## **4 Modele materiałowe użyte do analizy wpływu starzenia**

### **4.1 Wprowadzenie**

W celu przeprowadzenia kompletnej analizy konstrukcji wiszącej z tkaniny technicznej używając oprogramowania bazującego np. na metodzie elementów skończonych, musimy posiadać dane o strukturze kompozytu tkaniny oraz parametrach materiałowych samej tkaniny. W przedstawionej pracy główną uwagę poświęca się jednoosiowym związkom konstytutywnym, które można w łatwy sposób zintegrować z modelem sieci gęstej. Model ten uwzględnia różne właściwości materiału w dwóch głównych kierunkach pracy, nazywanych w tkaninach osnową oraz wątkiem. Zdecydowano się przeprowadzić analizę pracy tkanin architektonicznych w trzech zakresach: liniowym, lepkosprężystym oraz lepkoplastycznym. Każdorazowo parametry materiałowe wyznaczono osobno dla osnowy i wątku.

W pierwszej kolejności właściwości sprężyste tkaniny technicznej zostały ustalone na podstawie prób cyklicznych obciążenie – odciążenie. Jest to szczególnie ważne dla kierunku wątku, w którym to odpowiedź materiału pod wpływem obciążenia bywa bardzo skomplikowana. Jest to spowodowane różnymi metodami tkania lub przeplatania nici osnowy i wątku, a także wstępnym napięciem materiału, zwykle wykonywanym tylko w kierunku osnowy na etapie powlekania tkaniny warstwą np.: PVC.

Kolejnym krokiem analizy było zastosowanie modelu odcinkowo-liniowego do opisanie modułów sprężystości podłużnej oraz odpowiadających im wartościom odkształceń.

Tkaniny techniczne montowane na konstrukcjach pracują zwykle w zakresie lepkosprężystym. Z wielu modeli opisujących takie zachowanie tkanin (m.in. model Argyrisa czy Schapery'ego) wybrano czteroparametrowy model Burgersa, identyfikowany w przedstawionym opracowaniu z testu pełzania.

W chwilach ekstremalnych obciążeń konstrukcji, np. podczas porywów wiatru, awarii czy nieodpowiedniego montażu, mogą powstawać w tkaninach trwałe odkształcenia niesprężyste. Konieczna jest w takich sytuacjach możliwość przewidywania zachowania się tkaniny w

zakresie lepkoplastycznym. Jednym z modeli dobrze opisującym tkaniny techniczne jest model Bodnera-Partoma. Udowodniono wcześniej (Kłosowski, Zagubień i inni), że model ten dobrze opisuje zachowanie tkanin technicznych. Poza tym do identyfikacji jego parametrów wymagane są tylko badania jednoosiowego rozciągania z różnymi prędkościami odkształcenia.

W rozdziale tym przedstawiono szczegółowo wybrane modele konstytutywne, ich matematyczną strukturę oraz metodykę wyznaczania parametrów, wraz z niezbędnymi przekształceniami i wyprowadzeniami analitycznymi.

## **4.2 Model odcinkowo-liniowy**

Koncepcja nieliniowego modelu odcinkowo-liniowego bazuje na spostrzeżeniu, że nawet bardzo skomplikowaną krzywą doświadczalną można opisać za pomocą odpowiedniej liczby odcinków prostych. Nachylenia tych odcinków mogą być traktowane jako natychmiastowe sztywności podłużne, a wraz z zakresem odkształceń, w których one obowiązują, mogą tworzyć przedziałami zmienną zależność konstytutywną naprężenie-odkształcenie.

## **4.3 Lepkosprężysty model Burgers'a**

Model Burgers'a jest czteroparametrowym modelem lepkosprężystym przedstawionym w formie równania różniczkowego [183]. Jest to szeregowe połączenie modelu Maxwella oraz Kelvina-Voigta. Model Burgersa opisuje dobrze materiały wykazujące natychmiastowe odkształcenie sprężyste z równoczesną odpowiedzią płynięcia lepkiego i sprężystości opóźnionej. Może być identyfikowany z testów reologicznych pełzania lub relaksacji. Równanie Burgersa jest bardzo często stosowane do opisu lepkosprężystego zachowania cieczy, ale znajduje również zastosowanie w analizie metali, asfaltu, poliwęglanu oraz kompozytów polimerowych i naturalnych.

## **4.4 Lepkoplastyczny model Bodnera-Partoma**

Model Bodnera-Partoma został w 1975 roku zastosowany jego autorów do lepkosprężystoplastycznej analizy odkształceń i wzmocnienia płyty tytanowej [41]. Przez kolejne 40 lat został rozbudowany o składniki związane ze wzmocnieniem kinematycznym, termiczną regeneracją oraz zniszczeniem. Prawo to zostało również z dobrym skutkiem zaaplikowane do analizy tkanin technicznych, polimerów oraz naturalnych membran. Przedstawiane jest zwykle w formie równania różniczkowego. Procedura identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma jest stosunkowo prosta i wymaga jedynie testów jednoosiowego rozciągania z różnymi, ale stałymi prędkościami odkształcenia.



## **4.5 Podsumowanie**

W rozdziale tym przedstawiono dokładnie matematyczne podstawy wybranych modeli konstytutywnych oraz dokładne procedury identyfikacji ich parametrów. Celem nadrzędnym autora była chęć opisanie zachowania tkanin technicznych w trzech zakresach pracy: sprężystym, lepkosprężystym oraz lepkoplastycznym. W konsekwencji zastosowano modele: odcinkowo-liniowy, Burgersa oraz Bodnera-Partoma. Modele te zostaną użyte w dalszej części pracy do oceny trwałości badanych tkanin technicznych.

## **5 Analiza eksperymentalna**

### **5.1 Wstęp**

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały zrealizowane w Instytucie PRISME na Uniwersytecie w Orleanie oraz w Katedrze Mechaniki Budowli Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Autor osobiście przeprowadził wszystkie testy laboratoryjne.

### **5.2 Zaplecze laboratoryjne**

W rozdziale tym zaprezentowano stanowiska badawcze oraz wszystkie urządzenia potrzebne do realizacji zaplanowanych eksperymentów. Do przeprowadzenia testów laboratoryjnych zostały wykorzystane trzy typy maszyn wytrzymałościowych: maszyna do testów jednoosiowych Zwick/Roell Z020, maszyna do testów dwuosiowych oraz maszyna do przeprowadzania badań pełzania. Do celów symulowania procesu przyspieszonego starzenia wykorzystano komorę termiczną, będącą w stanie utrzymywać warunki temperatury w zakresie  $-70^{\circ}\text{C}$  do  $+250^{\circ}\text{C}$ . Warto podkreślić, że autor prezentowanej pracy był jednym z głównych projektantów maszyny do przeprowadzania prób pełzania oraz koordynatorem wszelkich prac organizacyjno-konstrukcyjnych związanych z jej wytworzeniem.

### **5.3 Próbkki oraz rodzaje badań**

Dwa rodzaje poliestrowych tkanin technicznych pokrytych PVC zostały poddane testom: VALMEX oraz AF9032. Pierwsza z nich występowała w dwóch typach: materiał UŻYWANY (the USED) przez 20 lat jako przekrycie dachu Opery Leśnej oraz materiał z tej samej partii produkcyjnej, ale NIEUŻYWANY (the NOT USED) i przechowywany jako zapasowy do przeprowadzania niezbędnych napraw eksploatacyjnych. Przyjęto, że materiał UŻYWANY doznał starzenia w warunkach naturalnych oraz eksploatacyjnych, podczas gdy materiał NIEUŻYWANY poddany był tylko upływowi czasu. Jednym z głównych celów przedstawionej

pracy jest analiza porównawcza właściwości mechanicznych oby typów tkanin i ocena wpływu starzenia eksploatacyjnego na zachowanie tkanin technicznych. W tym celu przeprowadzono na obu typach tkanin następujący szereg badań: jednoosiowe cykliczne testy obciążenia-odciążenia, jednoosiowe testy z różnymi prędkościami odkształcenia, testy dwuosiowe oraz testy pełzania z różnymi poziomami obciążenia. Różnice postanowiono śledzić poprzez zmianę parametrów prawo konstytutywnych zidentyfikowanych na podstawie poszczególnych badań.

Tkanina architektoniczna AF9032 w pierwotnym projekcie miała stanowić przekrycie nowego dachu Opery Leśnej w Sopocie, dlatego też została wybrana do badań przyspieszonego starzenia. Symulacja sztucznego starzenia polegała na utrzymywaniu próbek materiału w komorze termicznej w temperaturze 80° oraz 90°C przez okres do 12 tygodni. Co tydzień bądź dwa tygodnie część próbek była wyciągana, przechowywana w temperaturze pokojowej przez kolejny tydzień, a następnie poddawana testom jednoosiowego rozciągania pod kątem możliwości identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma. Zmiany tych parametrów miały dać obraz wpływu przyspieszonego starzenia na właściwości badanego materiału.

#### **5.4 Badania eksperymentalne**

Rozdział ten jest podzielony na dwa podrozdziały poświęcone odpowiednio starzeniu eksploatacyjnemu (tkanina VALMEX) oraz przyspieszonemu (tkanina AF9032). W każdym rozdziale opisano dokładnie warunki przeprowadzenia poszczególnych typów testów laboratoryjnych oraz przykładowe wyniki, najczęściej w formie wykresów naprężenie-odkształcenie. Wysznuo wnioski na podstawie wstępnej analizy tychże wykresów. Największe różnice w przebiegu krzywych dla obu typów starzenia zaobserwowano dla kierunku wątku, podczas gdy materiał w kierunku osnowy wykazał minimalne zmiany.

#### **5.5 Podsumowanie**

W tym rozdziale zostały zaprezentowane badania eksperymentalne przeprowadzone w celu oceny trwałości materiałów tekstylnych. Badaniom poddano dwie różne tkaniny techniczne: tkaninę VALMEX (ocena wpływu starzenia eksploatacyjnego) oraz tkaninę AF9032 (ocena wpływu starzenia przyspieszonego, laboratoryjnego). Wśród przeprowadzonych testów znalazły się badania jednoosiowego i dwuosiowego rozciągania, testy cyklicznego rozciągania typu obciążenie-odciążeniu oraz badania pełzania. Wszystkie testy zostały wykonane niezależnie dla kierunku osnowy i wątku. Dla tkaniny AF9032 opracowano harmonogram utrzymywania próbek w podwyższonej temperaturze 80°C i 90°C, który miał na celu symulowanie procesu przyspieszonego starzenia.

Przeprowadzone badania zostały wykonane z dużą starannością. Autor uczestniczył aktywnie we wszystkich próbach i samodzielnie opracowywał rezultaty. Uzyskane wyniki zostaną wykorzystane w dalszej części pracy.

## **6 Identyfikacja parametrów materiałowych i ich analiza**

### **6.1 Wprowadzenie**

W procesie identyfikacji parametrów materiałowych w niniejszej pracy często stosowana była aproksymacja z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Do tego celu wykorzystany został program SigmaPlot, w którym autor przygotował odpowiednie procedury identyfikacji. Dla każdej regresji przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wartości poprzez obliczanie wartości średniej z prób oraz odchylenia standardowego. W celu oszacowania różnic pomiędzy analizowanymi typami starzenia korzystano z obliczenia błędu względnego. Do weryfikacji uzyskanych rezultatów użyto współczynników determinacji i korelacji.

### **6.2 Wpływ obciążeń środowiskowych i serwisowych**

Pierwszym modelem przeanalizowanym pod kątem wpływu procesu starzenia eksploatacyjnego był model odcinkowo-liniowy. Wartości parametrów wytrzymałościowych (wytrzymałość na zerwanie  $UTS$ , wydłużenie przy zerwaniu  $\varepsilon_{ult}$ , umowna granica sprężystości  $\sigma_{02}$ ) oraz parametrów modelu odcinkowo-liniowego zostały zebrane dla testów jedno- i dwuosiowych odpowiednio w Table 6.1 i Table 6.2. Parametry wytrzymałościowe dla kierunku osnowy spadły wyraźnie dla materiału UŻYWANEGO w przypadku obu rodzaju testów (nawet o 23 % dla wytrzymałości na zerwanie). Dla kierunku wątku różnice parametrów wytrzymałościowych przybrały wyraźniejszy charakter przy badaniach dwuosiowych (osiągając nawet 18% dla wydłużenia przy zerwaniu). Starzenie eksploatacyjne wpłynęło jednakże najmocniej na pierwszą sztywność podłużną na kierunku wątku  $E_{F0}$ , utożsamianą ze sztywnością pokrycia PVC. Dla testów jednoosiowych zanotowano 32% spadek jej wartości dla tkaniny UŻYWANEJ w stosunku do NIEUŻYWANEJ. Ogólnie stwierdzono, że tkanina VALMEX po 20 latach użytkowania zachowała bardzo wysokie właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe, a co za tym idzie mogłaby być eksploatowana przez kolejne lata.

Drugim etapem rozważań była analiza badań cyklicznego obciążania-odciążania. Eksperymenty tego typu stosuje się zwykle jako podstawę do detekcji zniszczenia w

materiałach. Jednak w przedstawianej pracy głównym ich celem były ustalenie własności sprężystych tkaniny technicznej w obu kierunkach pracy materiału oraz dodatkowo ocena wpływu starzenia eksploatacyjnego. Dla każdego cyklu odciążenia i ponownego obciążenia zidentyfikowano sieczny moduł sztywności. Wyniki uzyskanych modułów w formie tabelarycznej zestawiono w Table 6.3, a graficznie w dziedzinie numeru cyklu na wykresie Fig. 6.3. Zaobserwowano, że dla kierunku wątku, to druga wartość modułu sztywności  $E_{F1}$  zidentyfikowana z prób jednoosiowych jest zbliżona do prawdziwego modułu Younga'a dla tego typu tkaniny. Tymczasem pierwsza wartość sztywności odpowiada za sztywność pokrycia z PVC. W konsekwencji przedstawiono 2 koncepcje rozpatrywania pracy tkaniny na kierunku wątku (Fig. 6.5). W pierwszej metodzie sztywność pokrycia jest pomijana, a wykres naprężenie-odkształcenie przesuwany do zerowych odkształceń używając wartości odkształcenia wynikającego z nachylenia drugiej sztywności podłużnej. W drugiej metodzie z kolei, obie sztywności są brane pod uwagę, a wykres jest przesuwany zgodnie z pierwszą sztywnością. To ostatnie podejście opisuje dokładne zachowanie się tkaniny podczas przykładania obciążenia, co jest szczególnie ważne podczas montażu tkaniny na konstrukcji i wpływa na końcowe wartości odkształceń pokrycia.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania pełzania i zidentyfikowano parametry modelu Burgersa. Po przeprowadzeniu weryfikacji otrzymanych wartości poprzez numeryczną symulację badania, zaobserwowano, że jakość identyfikacji zależy w dużym stopniu od wartości natychmiastowego odkształcenia, powyżej którego to punktu zaczyna się identyfikację parametrów prawa. Podsumowując, oceniono, że równanie Burgersa nie jest w stanie idealnie odwzorować przebiegu krzywej pełzania w całym jej zakresie przy jednym zestawie parametrów. Aby umożliwić analizę porównawczą materiału NIEUŻYWANEGO i UŻYWANEGO wybrano do obliczeń ten sam poziom natychmiastowego odkształcenia. Wartości błędów względnych pomiędzy dwoma typami tkaniny (Table 6.5) pokazały, że starzenie eksploatacyjne wpłynęło na parametry zidentyfikowane z liniowej części wykresu pełzania ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$ ) w dość znacznym stopniu, osiągając w niektórych przypadkach nawet 20% różnicy dla kierunku wątku (dla osnowy maksymalna różnica 11 %). W tym samym czasie współczynnik lepkości  $\eta_2$  dla osnowy i wątku nie uległ praktycznie żadnej zmianie i w analizie wpływu starzenia wpływ tej zmiany może być pomijany.

Ostatnim prawem do identyfikacji był model Bodnera-Partoma. Każda krzywa eksperymentalna przed rozpoczęciem identyfikacji, w celu pominięcia wpływu początkowych poślizgów w szczękach maszyny, jest zwykle przesuwana tak, aby uzyskać zerowe naprężenia dla zerowych odkształceń. Dla analizowanych tkanin, dla kierunku osnowy przesunięcie to wynikało z pierwszego nachylenia moduły sztywności podłużnej  $E_{W1}$ . Zbadano dodatkowo, że w celu poprawnej determinacji parametrów modelu na kierunku wątku, krzywą

eksperymentalną naprężenie-odkształcenie należy przesunąć zgodnie z nachyleniem wynikającym z drugiego modułu sztywności podłużnej  $E_{F1}$  (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**). Przeprowadzona weryfikacja potwierdziła poprawność identyfikacji parametrów prawa konstytutywnego dla obu kierunków materiału. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych są bardzo zbliżone do wyników prób laboratoryjnych. Dla kierunku wątku zaprezentowano dwa typy symulacji: uwzględniającą oraz pomijającą pierwszy moduł sztywności podłużnej  $E_{F0}$  (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** and **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**) Obliczone współczynniki determinacji dla wszystkich porównań przekraczają wartość  $R^2 = 0,98$ . Przedstawiona w prezentowanej pracy koncepcja identyfikacji parametrów prawa Bodnera-Partoma dla kierunku wątku jest zdecydowanym rozwinięciem metody zaproponowanej wcześniej przez Zagubienia, Kłosowskiego i innych dla podobnego typu tkaniny poliestrowej PANAMA. W swoich pracach autorzy przedstawili poprawną identyfikację parametrów materiałowych tylko dla kierunku osnowy. Dla kierunku wątku nie wyznaczyli oni współczynników, tylko przy założeniu, że nici mają taki samy przekrój poprzeczny i tę samą gęstość materiału w obu kierunkach, przyjęli dla kierunku wątku parametry wyznaczone dla kierunku osnowy. Zaproponowana w aktualnej pracy metoda pozwala na bezpośrednią identyfikację parametrów dla obu kierunków niezależnie, co przekłada się na lepszą zbieżność symulacji z wynikami eksperymentalnymi.

Otrzymane wyniki identyfikacji dla materiału NIEUŻYWANEGO i UŻYWANEGO (Table 6.6) pokazały, że największym zmianom uległy parametry  $m_1$ ,  $m_2$  (odpowiednio współczynniki wzmocnienia izotropowego i kinematycznego) oraz współczynnik  $D_1$  (odpowiadający maksymalnej wartości wzmocnienia kinematycznego). Zaobserwowano także, iż praktycznie wszystkie parametry zmieniły się znacznie bardziej dla kierunku wątku. Dla osnowy, różnice pomiędzy tkaniną NIEUŻYWANĄ i UŻYWANĄ były zdecydowanie mniejsze, czasami pomijalnie małe.

Głównym celem prezentowanych badań jest analiza wpływu starzenia poprzez zmiany wartości parametrów praw konstytutywnych. Aby dokonać poprawnej oceny tych zmian przeprowadzono analizę wrażliwości prawa Bodnera-Partoma. Wybrano metodę uzmienniania jednego parametru w danej chwili (ang. one-factor-at-a-time, w skrócie OFAT). Metoda ta nie uwzględnia interakcji między poszczególnymi parametrami, ale jednocześnie nie wymaga dużych nakładów obliczeniowych i daje bezpośrednią informację o tym jak poszczególne parametry wpływają na postać odpowiedzi modelu. Stwierdzono, że największy wpływ na przebieg krzywej prawa Bodnera-Partoma mają współczynniki  $m_1$  oraz  $n$  (współczynnik wrażliwości prędkości odkształcenia).

### 6.3 Wpływ przyspieszonego starzenia termicznego

Wpływ przyspieszonego starzenia na tkaninę AF9032 został opisany dwoma modelami: odcinkowo-liniowym oraz Bodnera-Partoma. W wyniku przeprowadzenia dużej liczby symulacji sztucznego starzenia dla dwóch różnych temperatur 80°C i 90°C oraz dla obu kierunków tkaniny, otrzymano znaczną bazę wyników, które zestawiono w tabelach w aneksie do pracy. Dla przejrzystości prezentacji wykreślono wartości poszczególnych parametrów w funkcji czasu starzenia. Aby ułatwić wnioskowanie, wyniki przedstawiono w formie znormalizowanej względem wartości referencyjnej uzyskanej dla ogrzewania próbki tylko przez 1 godzinę, co praktycznie odpowiadało zachowaniu się materiału nieogrzewanego wcale (pierwotnego).

W wyniku starzenia termicznego sztywność pokrycia  $E_{F0}$  wzrastała liniowo ze wzrostem czasu starzenia dla obu przyjętych temperatur, przy czym dla temperatury 90°C wzrost był zdecydowanie szybszy (Fig. 6.22.). Takie samo zachowanie zaobserwowano dla umownej granicy plastyczności (Fig. 6.25). Sztywność utożsamiana z modułem Younga dla obu kierunków tkaniny ( $E_{W1}$ ,  $E_{F1}$ ) i dla temperatury 80°C również wykazywała liniowy wzrost. Dla wyższej temperatury, dla obu kierunków nie odnotowano praktycznie żadnej zmiany wartości modułów sztywności w czasie starzenia (Fig. 6.24). Zmiany parametrów wytrzymałościowych (wytrzymałość na zerwanie  $UTS$  oraz wydłużenie przy zerwaniu  $\epsilon_{ult}$ ) dla temperatury 80°C i obu kierunków oraz dla 90°C i kierunku osnowy także dały się opisać równaniami prostych. Z kolei dla kierunku wątku zmiany dla obu tych parametrów nie podążały liniową ścieżką. Podsumowując, sztuczne starzenie najmocniej wpłynęło na sztywność pokrycia. Wykazano także, że materiał doznał większych zmian w kierunku wątku niż w kierunku osnowy.

Analizując zmienność parametrów prawa Bodnera-Partoma w czasie starzenia, zaobserwowano, że dla obu kierunków materiału odnotowane tendencje można opisać funkcjami liniowymi oraz że są one takie same (rosnące bądź malejące) dla temperatury 80°C i 90°C. Jedyne w przypadku parametrów  $D_1$  i  $n$  zauważono pewne rozbieżności od tej reguły (odpowiednio Fig. 6.31 i Fig. 6.33).

Ostatnim etapem analizy było zastosowanie metodyki Arrheniusa do przybliżonej ekstrapolacji czasu przyspieszonego starzenia na czas rzeczywistego, naturalnego starzenia. Zgodnie z uproszczoną zasadą „10 stopni”, podwyższenie temperatury o 10°C względem temperatury referencyjnej przyspiesza tempo reakcji chemicznych dwukrotnie. Temperaturę referencyjną, jako temperaturę otoczenia dla Operry Leśnej w Sopocie ustalono na podstawie danych meteorologicznych ze stacji monitoringu nowej konstrukcji przekrycia. Wyniosła ona 8°C. Zgodnie z teorią Arrheniusa starzenie materiału w 80°C przez okres 6 tygodni odpowiada w tym przypadku starzeniu w temperaturze 90°C przez okres 3 tygodni, co w obu przypadkach odpowiada naturalnemu starzeniu wynoszącemu ok. 17 lat (Table 6.7). Wyniki dla 90°C

przeliczono zgodnie z tą zasadą i porównano z wynikami dla 80°C (Fig. 6.34). Dla kierunku wątku parametry wytrzymałości na zerwanie  $UTS$ , wydłużenia przy zerwaniu  $\varepsilon_{ult}$  i moduł sztywności  $E_{F2}$  pokryły się idealnie dla temperatury 80°C i dla ekstrapolowanej temperatury 90°C. Pozostałe współczynniki modeli odcinkowego i Bodnera-Partoma ułożyły się w linie równoległe względem siebie. Dla kierunku osnowy nie wyniki nie były tak regularne i nie udało się ustalić wspólnej tendencji między krzywymi dla różnych temperatur. Zachowanie się parametrów dla kierunku wątku potwierdza słuszność tez Arrheniusa.

Biorąc pod uwagę fakt, że starzenie eksploatacyjne w podobny sposób wpłynęło na zachowanie się parametrów analizowanych praw materiałowych (wzrost sztywności pokrycia, liniowe zależności większości współczynników itd.), można wysnuć wniosek, że sztuczne starzenie termiczne może służyć jako podstawa do przewidywania zachowania się tkanin technicznych. Jednakże w celu potwierdzenia zauważonych zależności należy przeprowadzić dodatkowe badania. Celem autora jest rozszerzenie przedstawionego programu badań o symulacje starzenia uwzględniające więcej różnych temperatur oraz czasów starzenia. Podobnie planuje się przeprowadzić badania tkanin użytkowanych na konstrukcji, z których próbki pobierane byłyby kilkakrotnie w czasie eksploatacji, tak aby zwiększyć ilość punktów (czasowych) analizy starzenia eksploatacyjnego.

#### **6.4 Podsumowanie**

W tym rozdziale została zawarta identyfikacja parametrów dla modeli odcinkowo-liniowego, Burgersa oraz Bodnera-Partoma. Omówiono napotkane podczas procesu determinacji problemy oraz ich rozwiązania. Analiza porównawcza materiału VALMEX NIEUŻYWANEGO I UŻYWANEGO wykazała, że starzenie eksploatacyjne największy wpływ miało na sztywność pokrycia tkaniny. Zauważono także, że materiał w kierunku wątku doznał większych zmian pod wpływem starzenia. Podobne wnioski wyciągnięto z analizy sztucznego przyspieszonego starzenia tkaniny AF9032. Dodatkowo zaobserwowano, że praktycznie wszystkie parametry prawa odcinkowo-liniowego oraz Bodnera-Partoma dało się opisać równaniami prostych. Ekstrapolacja wyników zgodnie z założeniami teorii Arrheniusa dla kierunku wątku potwierdziła poprawność tych założeń. Podobieństwa w wynikach dla starzenia eksploatacyjnego oraz przyspieszonego dają możliwość stosowania tego drugiego do przewidywania zachowania się tkanin eksploatowanych w warunkach rzeczywistych. Uzyskane zależności liniowe parametrów praw materiałowych mogą być bezpośrednio zastosowane w symulacjach numerycznych struktur z tkanin technicznych.

## 7 Wnioski

Na zakończenie niniejszej pracy wyciągnięto następujące wnioski:

- Tkaniny techniczne jako materiały kompozytowe wzmacniane matą z nici osnowy i wątku wyróżniają się skomplikowaną odpowiedzią pod działaniem przyłożonego obciążenia. Z tego powodu koniecznym jest przeprowadzanie badań obciążenie-odciążenie celem dokładnego ustalenia charakterystycznych modułów sprężystości i wzmocnień. Wielkości te stanowią podstawę identyfikacji wielu praw materiałowych.
- Model odcinkowy jest wystarczająco dobry do technicznego opisu parametrów sztywności tkanin technicznych, nawet dla kierunku wątku.
- Zaobserwowano, że identyfikacja parametrów prawa Burgersa zależy w dużej mierze od poziomu natychmiastowego odkształcenia uwzględnianego podczas obliczeń. Im wyższa jest jego wartość, tym lepsze dopasowanie funkcji modelu do wyników eksperymentalnych w pierwszej nieliniowej części pełzania, ale gorsze w pozostałej, liniowej części.
- Zaproponowano, aby podczas identyfikacji parametrów modelu Burgersa wybrać taki poziom odkształcenia natychmiastowego, który zagwarantuje lepsze dopasowanie funkcji prawa w zakresie, który interesuje konstruktora danego obiektu.
- Potwierdzono, że model Bodner-Partoma może być wykorzystywany do modelowania zachowania się tkanin w zakresie lepkoplastycznym. Zdecydowanie rozwinięto sposób identyfikacji tego modelu w stosunku do poprzednio stosowanych metod. Wcześniej parametry dla kierunku wątku nie były wprost identyfikowane. Dzięki zaproponowanej metodzie przesuwania krzywej naprężenie-odkształcenie zgodnie z odpowiednią sztywnością podłużną, umożliwiono w niniejszej pracy przeprowadzenie determinacji współczynników niezależnie dla obu kierunków tkaniny.
- Zaproponowano dwie metody przedstawiania wyników dla kierunku wątku na podstawie modelu odcinkowego oraz modelu Bodnera-Partoma. W pierwszym podejściu tylko jeden moduł sztywności był brany pod uwagę w liniowym zakresie odkształceń; w drugim - dwa moduły. Poza zakresem elastycznym parametry Bodnera-Partoma sterowały przebiegiem krzywej naprężenie-odkształcenie w obu przyjętych koncepcjach.
- Na podstawie analizy wrażliwości prawa Bodnera-Partoma ustalono, że na przebieg krzywej modelu największy wpływ mają współczynniki wzmocnienia izotropowego  $m_1$  oraz parametr sterujący wrażliwością na prędkość odkształcenia  $n$ .
- Analiza porównawcza tkaniny NIEUŻYWANEJ i UŻYWANEJ wykazała, że materiał po 20 latach eksploatacji zachował wysokie właściwości wytrzymałościowe i mógłby być używany jeszcze przez kilka kolejnych lat.
- Starzenie eksploatacyjne wpłynęło najmocniej na wzrost sztywności materiału pokrycia (PVC), podczas gdy sztywność włókien poliestrowych praktycznie pozostała bez zmian.



Obserwacja ta dowodzi, że włókna poliestrowe nie są podatne na starzenie eksploatacyjne i środowiskowe albo, że materiał pokrycia wystarczająco ochrania warstwę wzmocnienia kompozytu tkaninowego.

- Analiza modelu Burgersa wykazała, że starzenie eksploatacyjne najbardziej wpłynęło na wartości parametrów  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$ , identyfikowanych z liniowej części krzywej pełzania odkształcenie-czas. Parametr  $\eta_2$ , identyfikowany z nieliniowej części wykresu pełzania, nie uległ żadnej zmianie. Wynika z tego, że ta część wykresu nie ulega wpływowi starzenia i może razem z parametrem  $\eta_2$  być pomijana podczas analizy trwałości dla tego typu tkaniny.
- Analiza starzenia przyspieszonego wykazała, że sztywność pokrycia PVC dla tkaniny AF9032 wzrosła. Jednocześnie zauważono, że wartości parametrów wytrzymałościowych oraz modelu odcinkowego zmieniają się liniowo w dziedzinie czasu starzenia dla obu analizowanych temperatur starzenia 80°C i 90°C.
- Ewolucja parametrów dla modelu Bodnera-Partoma również wykazała zależność liniową względem czasu starzenia dla obu temperatur, dla obu kierunków materiału. Dla kierunku osnowy nie wszystkie zależności dla obu temperatur wykazały ten sam rosnący/malejący charakter. Można stwierdzić, że rezultaty starzenia termicznego tkaniny AF9032 w kierunku wątku wykazują się prostszą do przewidzenia tendencją, niezależną od zastosowanej w tym badaniu temperatury starzenia.
- Zmiany parametrów modelu Bodnera-Partoma można opisywać zależnościami liniowymi względem temperatury starzenia i czasu. Obserwacja ta, daje możliwość zastosowanie tego prawa do analizy przekryć z tkanin poliestrowych i przewidywania ich zachowania w przyszłości. Analizy numeryczne całej konstrukcji dachu Opery Leśnej w Sopocie z zastosowaniem przeanalizowanych w tej rozprawie praw konstytutywnych tworzą trzon przyszłej pracy autora nad starzeniem tkanin technicznych.
- Wyniki przyspieszonego starzenia termicznego zostały ekstrapolowane z zastosowaniem metodyki zaproponowanej przez Arrheniusa. Zgodnie z uproszczoną zasadą zwaną „zasadą 10 stopni”, można obliczyć, że starzenie materiału w 80°C przez okres 6 tygodni odpowiada starzeniu w temperaturze 90°C przez okres 3 tygodni, co w obu przypadkach odpowiada naturalnemu starzeniu wynoszącemu ok. 17 lat. Wyniki dla 90°C przeliczono zgodnie z zasadą 10 stopni i porównano z wynikami dla 80°C. Dla kierunku wątku zaobserwowano te same tendencje dla obu temperatur, co potwierdza słuszność tezy Arrheniusa. Dla kierunku osnowy nie było możliwości określenia zbieżnych tendencji. W celu potwierdzenia zauważonych zależności należy jednak przeprowadzić dodatkowe badania uwzględniające więcej różnych temperatur oraz czasów starzenia.

- Niskie współczynniki korelacji dla niektórych regresji są spowodowane małą liczbą punktów eksperymentalnych branych pod uwagę podczas obliczeń. Inne typy funkcji aproksymujących mogłyby polepszyć tę sytuację (będzie to celem dalszych analiz).
- Założona na początku rozprawy teza została częściowo potwierdzona. Większość parametrów praw konstytutywnych uległa zmianie pod wpływem starzenia. Z drugiej strony, niektóre parametry (np.  $\eta_2$  w modelu Burgersa) pozostały nieczułe na działanie starzenia.