

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
KATEDRA MECHANIKI BUDOWLI

Praca doktorska pt.:

*BADANIA LABORATORYJNE I IDENTYFIKACJA
NIESPRĘŻYSTYCH WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH
TKANINY POWLEKANEJ TYPU „PANAMA”*

Mgr inż. Adam Zagubień

Promotor:

Dr hab. inż. Paweł Kłosowski

Koszalin, 2002 r.

Wykaz ważniejszych oznaczeń	3
1. Wprowadzenie	5
1.1. Cel i zakres pracy	6
1.2. Literatura związana z zastosowaniem i badaniami materiałów tekstylnych, przykładowe konstrukcje, stosowane materiały	8
1.3. Lepkoplastyczne związki konstytutywne oraz ustalanie ich parametrów	14
2. Doświadczenia doraźne	17
2.1. Opis doświadczeń	18
2.2. Identyfikacja sprężystych parametrów materiału	22
3. Doświadczenia reologiczne	28
4. Lepkoplastyczne związki konstytutywne	33
4.1. Model Bodnera-Partoma	33
4.2. Model Chaboche'a	35
4.3. Metodyka wyznaczania parametrów Bodnera-Partoma	36
4.4. Metodyka wyznaczania parametrów Chaboche'a	41
4.4.1. Metodyka identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a na podstawie znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma	42
4.4.2. Metodyka identyfikacji bezpośredniej na podstawie badań	45
5. Identyfikacja parametrów	47
5.1. Przygotowanie wyników doświadczalnych do identyfikacji	47
5.2. Identyfikacja parametrów modelu Bodnera-Partoma	49
5.3. Analiza wyników identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma	52
5.4. Identyfikacja parametrów modelu Chaboche'a	55
5.4.1. Identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a na podstawie znanych pa- rametrów prawa Bodnera-Partoma	55
5.4.2. Identyfikacja bezpośrednia parametrów modelu Chaboche'a na podsta- wie badań	57
5.5. Uwagi dotyczące identyfikacji	58
6. Weryfikacja wyników identyfikacji	61
6.1. Weryfikacja wyników identyfikacji parametrów prawa Bodnera-Partoma	64
6.2. Weryfikacja wyników identyfikacji parametrów prawa Chaboche'a	72

7. Model powłoki tekstylnej	82
8. Wnioski i uwagi końcowe	85
9. Załączniki	89
Summary.....	90
Zusammenfassung.....	90
Bibliografia	91
Podziękowania	96

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
A	- pole przekroju
A_1, A_2	- parametr materiałowy w modelu Bodnera-Partoma
β	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
b	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
c	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
D_0, D_1	- parametr materiałowy w modelu Bodnera-Partoma
ε	- odkształcenie (w jednoosiowym stanie naprężenia)
$\{\varepsilon\}$	- wektor odkształceń w rodzinach nici
ε_p	- odkształcenie niesprężyste (w jednoosiowym stanie naprężenia)
$\dot{\varepsilon}_p$	- prędkość odkształcenia niesprężystego (w jednoosiowym stanie naprężenia)
E	- moduł Younga
$\dot{\mathbf{E}}^l$	- tensor prędkości odkształcenia niesprężystego
F	- siła zewnętrzna
φ	- wilgotność względna powietrza
γ	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
$\bar{\gamma}$	- funkcja prędkości pracy wzmocnienia
$J(\boldsymbol{\sigma}')$	- drugi niezmiennik dewiatora tensora naprężenia
k	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a, statyczna granica sprężystości
K	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
l	- parametr materiałowy w modelu Chaboche'a
m_1, m_2	- parametr materiałowy w modelu Bodnera-Partoma
n	- parametr materiałowy w modelu Bodnera-Partoma lub Chaboche'a
n_1, n_2	- parametr materiałowy w modelu Bodnera-Partoma
p, \dot{p}	- akumulowana wartość odkształcenia niesprężystego i jej prędkość

R	- funkcja wzmocnienia izotropowego
R_0, R_1, R_2	- parametry materiałowe w modelu Bodnera-Partoma lub Chaboche'a
$\{S\}$	- wektor naprężeń w płaskim stanie naprężenia
σ	- naprężenie w jednoosiowym stanie naprężenia
$\{\sigma\}$	- wektor naprężeń w rodzinach nici
σ_{02}	- umowna granica sprężystości
σ, σ'	- tensora naprężenia i jego dewiator w trójosiowym stanie naprężenia
T	- temperatura
t	- czas
$\{\xi\}$	- wektor odkształceń w płaskim stanie naprężenia
u	- przemieszczenie
X, X', \dot{X}	- tensor wzmocnienia kinematycznego, jego dewiator oraz tensor prędkości wzmocnienia kinematycznego

1. Wprowadzenie

Tekstylne powierzchnie nośne są niezwykle osiągnięciem architektonicznym i inżynierskim. Ich duża funkcjonalność polega na tym, że pozwalają zadaszyć duże powierzchnie przy małej liczbie podpór. Nasuwa się pytanie, czy takie konstrukcje są nam potrzebne? Oczywiście, że tak, po pierwsze tam, gdzie zachodzi konieczność ochrony przed opadami atmosferycznymi dużych skupisk ludzkich, takich jak na meczach sportowych, pokazach teatralnych, koncertowych czy targach. Istnieje także wiele zastosowań tego typu konstrukcji w przemyśle, jak na przykład zadaszenia hangarów, portów lotniczych, dworców kolejowych oraz powierzchni magazynowych. Bogatą prezentację konstrukcji namiotowych i membranowych z wykorzystaniem materiałów tekstylnych można znaleźć w pracach [7], [24] oraz w licznych numerach kwartalnika *Bauen mit Textilien* wydawanego od 1999 roku.

Stosowanie materiałów tekstylnych jest jednak trudne i stwarza wiele problemów związanych z określeniem nieliniowych właściwości fizycznych tych materiałów. Obecnie, projektując konstrukcję, należy mieć na uwadze przede wszystkim dwa aspekty. Pierwszy, to wiarygodność i pewność stosowanych rozwiązań, drugi, to ekonomika i racjonalne kształtowanie. Gwałtowny rozwój w ostatnich latach teorii ośrodków ciągłych, teorii lepkoplastyczności, metod numerycznych w mechanice oraz systemów i maszyn obliczeniowych, stworzył warunki, w których analizowanie złożonych problemów stało się możliwe. Nie można jednak zapominać, że aby skorzystać z tych udogodnień w celu obliczenia rzeczywistych konstrukcji, należy znać właściwości fizyczne stosowanych materiałów. Dokładne poznanie tych właściwości możliwe jest jedynie na drodze eksperymentalnej lub symulacji numerycznych weryfikowanych doświadczeniami, co wielokrotnie podkreślone jest w monografiach [43], [44].

Przedmiotem niniejszej pracy jest próba zastosowania lepkoplastycznych modeli konstytutywnych do opisu właściwości materiałowych tkaniny tekstylnej powlekaniej PANAMA. W pracy ustalono program badań laboratoryjnych niezbędnych do określenia tych wielkości. Wykonano identyfikację parametrów materiałowych dla dwóch modeli lepkoplastycznych związków konstytutywnych. Przeprowadzono weryfikację obliczonych parametrów poprzez porównanie badań laboratoryjnych z symulacją numeryczną tych prób wykonaną na podstawie wyznaczonych parametrów. Wykazano także różnice pomiędzy wynikami identyfikacji obu modeli na tle doświadczeń.

1.1. Cel i zakres pracy

W literaturze znaleźć można kilkanaście modeli opisujących zjawiska lepkoplastyczne. Jednak stosowano je dotychczas głównie do opisu takich materiałów jak metale i beton.

Teza rozprawy. *Możliwe jest zastosowanie modeli zbudowanych dla lepkoplastycznych związków konstytutywnych, typowych dla metali, do opisu nieliniowych właściwości materiałowych powlekanej tkaniny tekstylnej.*

Podstawowym celem autora niniejszej rozprawy jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych i opracowanie procedur numerycznych pozwalających na identyfikację lepkoplastycznych związków konstytutywnych oraz weryfikację otrzymanych wyników.

Pracę stanowi dziewięć rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono tezę rozprawy, którą autor stara się udowodnić w następnych rozdziałach. Omówiono także bibliografię dotyczącą prezentowanej w rozprawie tematyki. Literaturę tę podzielono na dwie zasadnicze części. W części pierwszej zaprezentowano ważniejsze osiągnięcia, dotyczące projektowania tekstylnych przekryć wiszących i pneumatycznych, prezentując je w kolejności chronologicznej. Omówiono także prace związane z prowadzeniem badań materiałów tekstylnych powlekanych. W części drugiej przedstawiono literaturę poruszającą problematykę ustalania parametrów lepkoplastycznych związków konstytutywnych.

W rozdziale drugim opisano przeprowadzone doświadczenia doraźne, na podstawie których dokonano w dalszej części pracy identyfikacji parametrów materiałowych powlekanej tkaniny tekstylnej PANAMA. Doświadczenia te przeprowadzone zostały na próbkach o szerokości 50 mm poddanych jednoosiowemu rozciąganiu w maszynie wytrzymałościowej. Badania wykonano osobno dla dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków wątku i osnowy, zgodnych z głównymi kierunkami ortotropii materiału. Zaprezentowano metodykę przeprowadzonych badań doraźnych oraz zidentyfikowano sprężyste właściwości badanej tkaniny powlekanej. Przedstawiono także problemy związane z identyfikacją tych parametrów.

W rozdziale trzecim przedstawiono przeprowadzone badania reologiczne. Wykonane zostały próby pełzania na próbkach o szerokości 50 mm i długości 250 mm. Badania wykonano ponownie dla kierunku wątku i osnowy. Omówiono stanowisko do badań pełzania oraz podano metodykę badawczą. Wyniki zaprezentowano w formie

graficznej, przedstawiając wykresy odkształcenie – czas dla różnych poziomów obciążenia próbek. Uzasadniono także zastosowanie lepkoplastycznych związków konstytutywnych dla tego typu materiału.

Rozdział czwarty poświęcony został omówieniu zastosowanych w rozprawie modeli lepkoplastycznych związków konstytutywnych Bodnera-Partoma i Chaboche'a. Podane zostały główne założenia tych praw oraz sposoby wyznaczania ich parametrów. Przyjęto warianty praw pozbawione członów związanych z procesami regeneracji. Tego zabiegu dokonano w celu maksymalnego uproszczenia modeli i zredukowania ilości poszukiwanych stałych materiałowych.

W rozdziale piątym przeprowadzona została identyfikacja parametrów materiałowych wybranych wcześniej lepkoplastycznych praw konstytutywnych. Do identyfikacji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Spośród wielu wariantów tej metody wybrano algorytm Marquardta-Lerenberga [40] zastosowany w komercyjnym programie komputerowym SIGMAPLOT [53]. Algorytm ten pozwala na aproksymację dowolnej nieliniowej funkcji dla dowolnie zadanych parametrów początkowych¹⁾. W rozdziale tym omówiono trudności napotkane w czasie identyfikacji parametrów praw konstytutywnych, zarówno te związane ze specyfiką badanego materiału tekstylnego, jak i inne związane na przykład z ustaleniem wartości parametrów początkowych rozpatrywanych równań.

Rozdział szósty prezentuje weryfikację przeprowadzonych identyfikacji. Weryfikacja polegała na porównaniu przeprowadzonych badań z symulacją komputerową takich badań na podstawie wyznaczonych parametrów materiałowych. Opisane zostały algorytmy stosowanych do symulacji programów komputerowych oraz sposób przygotowania danych do tych programów. Weryfikację starano się przedstawić na jak największej liczbie przykładów. W związku z tym, na tle symulacji numerycznych prezentowane są także te próby doświadczalne, które z różnych powodów zostały wykluczone podczas procesu identyfikacji parametrów materiałowych.

W rozdziale siódmym zaprezentowano ortotropowy element skończony modelu sieci gęstej, używany do obliczeń przekryć tekstylnych. Model ten pozwala zastosować rezultaty identyfikacji parametrów materiałowych wyznaczonych dla jednoosiowego stanu naprężenia w modelu tkaniny podanemu płaskiemu stanowi naprężenia, co umożliwia zastosowanie otrzymanych wyników dla rzeczywistej tkaniny.

¹⁾ Ten sam algorytm wykorzystano do przygotowania danych eksperymentalnych do identyfikacji.

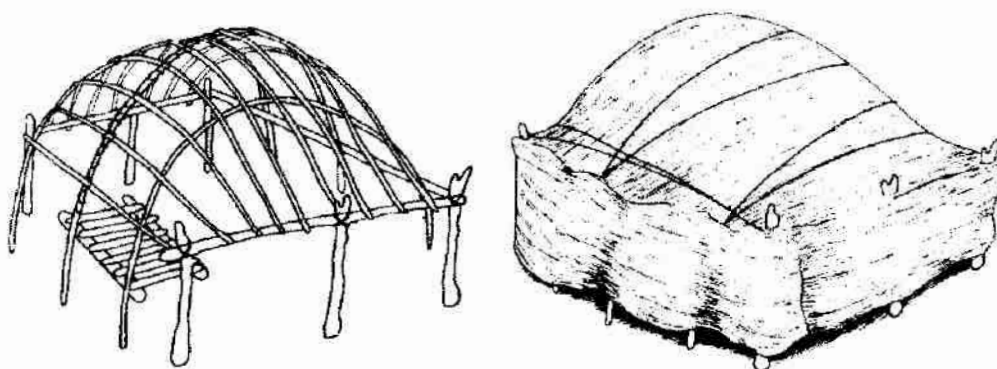
W rozdziale ósmym prezentowane są uwagi i wnioski końcowe. W rozdziale tym autor stara się zwrócić uwagę na te aspekty pracy, które potwierdzają słuszność postawionej na początku tezy rozprawy.

Rozdział dziewiąty zatytułowany Załączniki, zawiera płytę CDR z zapisanymi wynikami przeprowadzonych doświadczeń i identyfikacji. Zdecydowano się na tę formę prezentacji załączników, ze względu na olbrzymią ich objętość, kilkakrotnie przewyższającą objętość samej rozprawy.

W pracy użyto dwojako zwrotu „naprężenie”: raz stosując nazewnictwo typowe dla tkanin i podając jednostkę N/m, natomiast w rozdziale 4.1 i 4.2 (dla ogólności opisywanych zależności) przez „naprężenie” należy rozumieć pojęcie typowe w mechanice ośrodków ciągłych z właściwą jednostką np. N/m^2 .

1.2. Literatura związana z zastosowaniem i badaniami materiałów tekstylnych, przykładowe konstrukcje, stosowane materiały

Rys historyczny. Odkąd człowiek opuścił jaskinie w poszukiwaniu pożywienia potrzebował schronienia, które mógłby łatwo transportować. I tak ok. 40 000 lat temu powstały pierwsze konstrukcje namiotowe wykonane ze skóry lub tkaniny (rys. 1.1)²⁾.

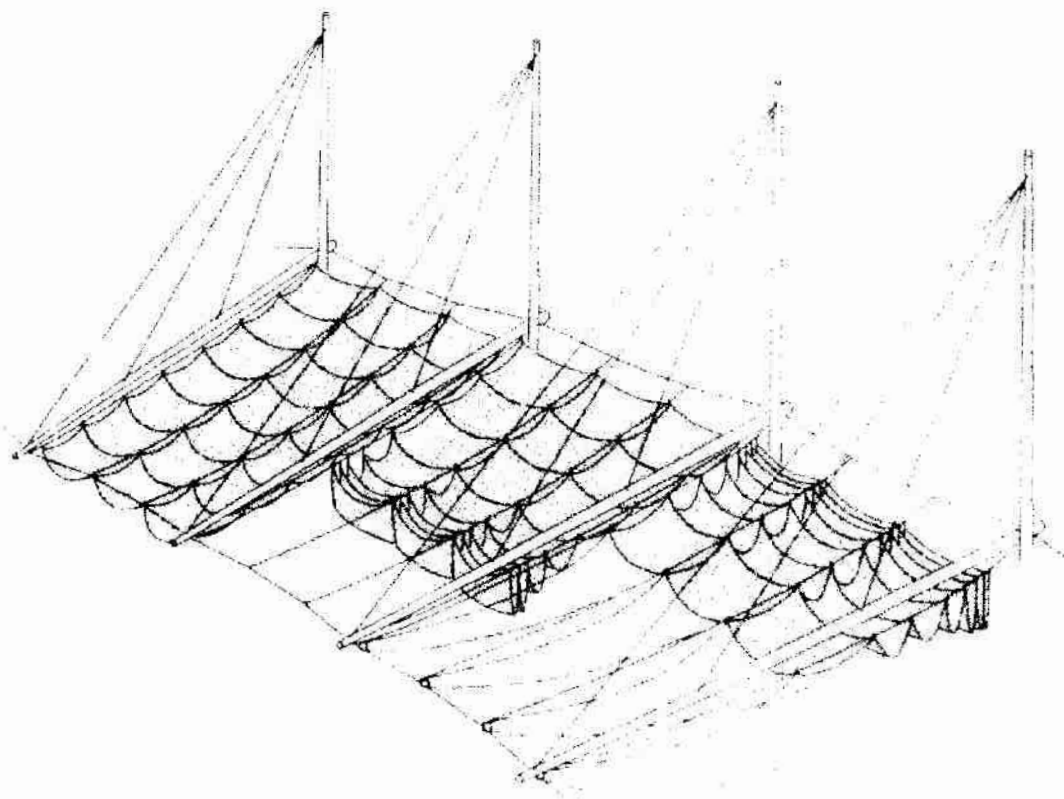


Rys. 1.1. Pierwsze konstrukcje namiotowe

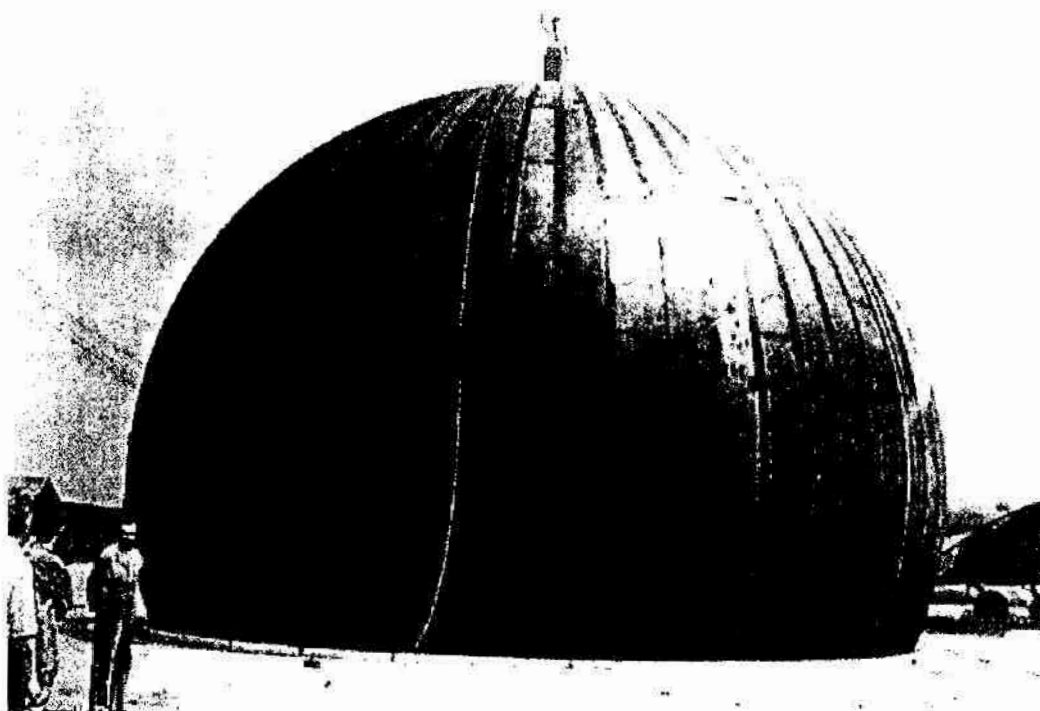
W starożytności największe namioty i konstrukcje membranowe budowali rzymianie, głównie jako obiekty zaplecza dla walczącej armii. Pojawiały się także konstrukcje membranowe spełniające rolę zadaszania teatrów i amfiteatrów, których przykładem jest konstrukcja zwana Vela, rys. 1.2.

²⁾ Prezentowane w tym rozdziale ilustracje zaczerpnięto z publikacji [7], [24].

Przykładem konstrukcji membranowej naszych czasów jest mający około 200 lat namiot cyrkowy „Chapiteau”. Pierwszą konstrukcją pneumatyczną wykonaną z materiału tekstylnego był „dom podpierany powietrzem”, którego pomysł zrodził się 1917 roku, ale realizacja nastąpiła dopiero w 1949 roku w USA. Obiekt ten, zwany „Birdair”, zaprojektowany przez Waltera Bird’a, zbudowany został do celów militarnych, rys. 1.3.



Rys. 1.2. Struktura Vela



Rys. 1.3. Konstrukcja pneumatyczna „Birdair”

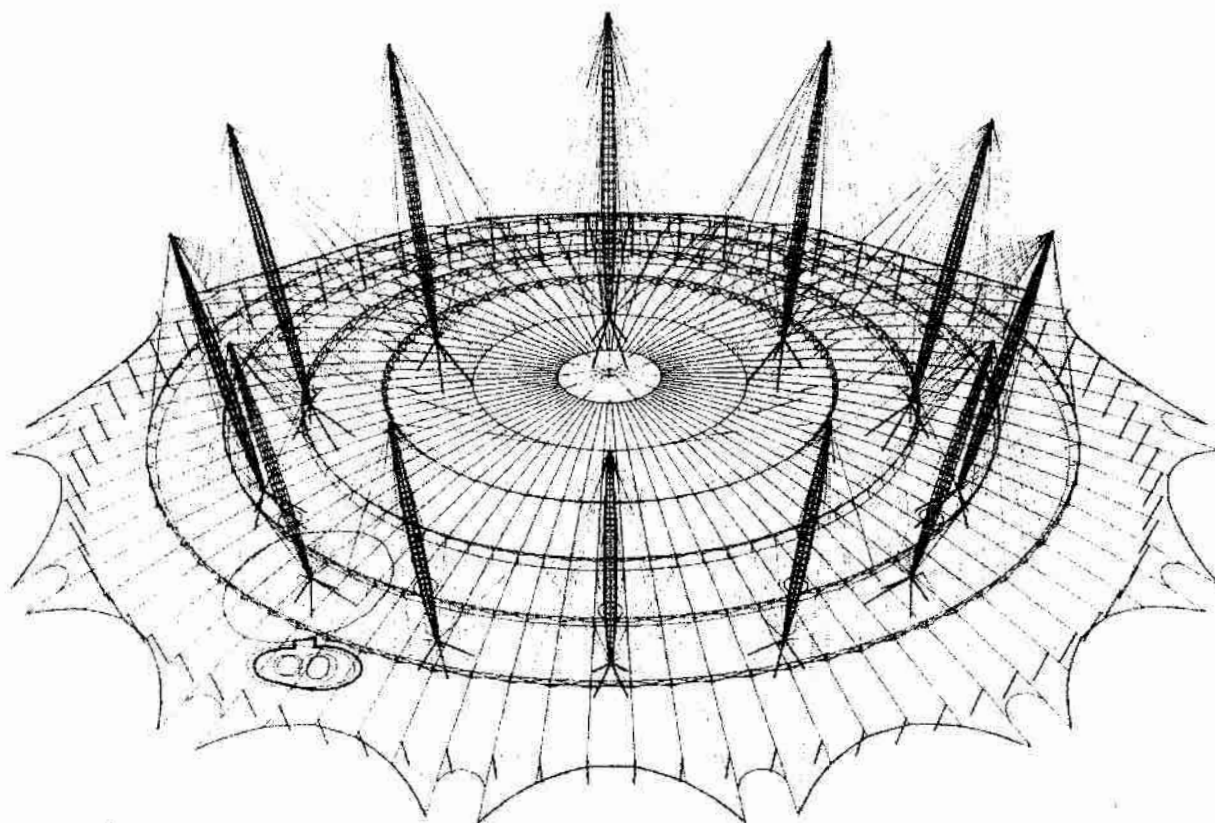
Kamieniem milowym w konstruowaniu napiętych przekryć tekstylnych, stało się zadaszenie (20 000 m²) stadionu olimpijskiego w Montrealu projektowane od 1976, a zrealizowane w roku 1989, rys. 1.4.



Rys. 1.4. Stadion olimpijski w Montrealu

Kolejnym rekordem było zrealizowane 1997 roku zadaszenie Arena Georgia Dome w Atlancie o powierzchni 37 200 m². Największą dotychczas zbudowaną konstrukcją wiszącą jest Millennium Dome w Londynie, gdzie jednym tekstylnym dachem zadaszone jest ponad 80 000 m² powierzchni, rys. 1.5.

Gwałtowny rozwój tekstylnych konstrukcji membranowych nastąpił w ostatnich 40 latach. Ma to związek z powstaniem nowych materiałów tekstylnych.



Rys. 1.5. Hala widowiskowa Millennium Dome w Londynie

Materiały. Na świecie w przekryciach powłokowych stosowanych jest wiele różnych materiałów tekstylnych powlekanych. Materiały te w większości wykonane są z włókien syntetycznych poliamidowych (nylon), poliestrowych, szklanych, aramidowych. Rzadziej stosowane są włókna organiczne jak bawełna czy jedwab. Szczegółowy opis materiałów stosowanych do produkcji powlekanych tkanin technicznych można znaleźć w pracach [5], [21], [24], [26].

Włókna bawełniane:

Ten typ włókna organicznego używany jest do przekryć niewielkich struktur membranowych. Stanowią one przekrycie konstrukcji drobnej architektury ogrodowej lub reklamowej. Obecnie najczęściej jednak stosowane są w tkaninach namiotowych. Organiczne właściwości tego materiału sprzyjają wchłanianiu wilgoci i rozwojowi grzybów. Ograniczeniem w stosowaniu jest też krótki wynoszący około 5 lat czas użytkowania.

Włókna poliamidowe:

Włókna nylonowe posiadają słabą odporność na promienie UV, wykazują znaczne zmiany długości pod wpływem wilgoci, co wpływa na niewielkie zastosowanie tych włókien w przekryciach tekstylnych. Ze względu na mały ciężar i znaczną wytrzymałość na zerwanie stosowane są w żeglarskim.

Włókna poliestrowe:

Włókna te, podobnie jak włókna szklane są najbardziej popularnymi materiałami stosowanymi na zadaszenia. Charakteryzują się one dobrą wytrzymałością na zerwanie oraz dużą sprężystością. Ponieważ ich znaczne wydłużenia przed uplastycznieniem są „tolerowane” przez materiał, pozwala to także na niewielkie korekty naciągu podczas montażu. Jednak dobre właściwości mechaniczne tego materiału zmniejszają się wraz ze starzeniem się i z powodu oddziaływania promieni słonecznych.

Włókna szklane:

Materiał ten posiada dużą wytrzymałość na zerwanie, ale ma małą sprężystość. Ze względu na kruchość wymaga ostrożności i precyzji podczas produkcji i montażu. Niewielki wpływ na właściwości mechaniczne ma starzenie się włókien. Natomiast

wyraźnie widoczny jest wpływ wilgotności na spadek wytrzymałości tkaniny z tego materiału.

Włókna aramidowe:

Jest to nowy typ włókien odkryty jednocześnie przez firmę Akzo i produkowany pod nazwą Twaron i firmę DuPont, która stosuje nazwę Kevlar. Materiał ten posiada bardzo wysoką wytrzymałość na zerwanie oraz dużą odporność na chemikalia. Wadą tkaniny z włókien aramidowych jest mała sprężystość oraz mała odporność na wysoką temperaturę i promienie UV.

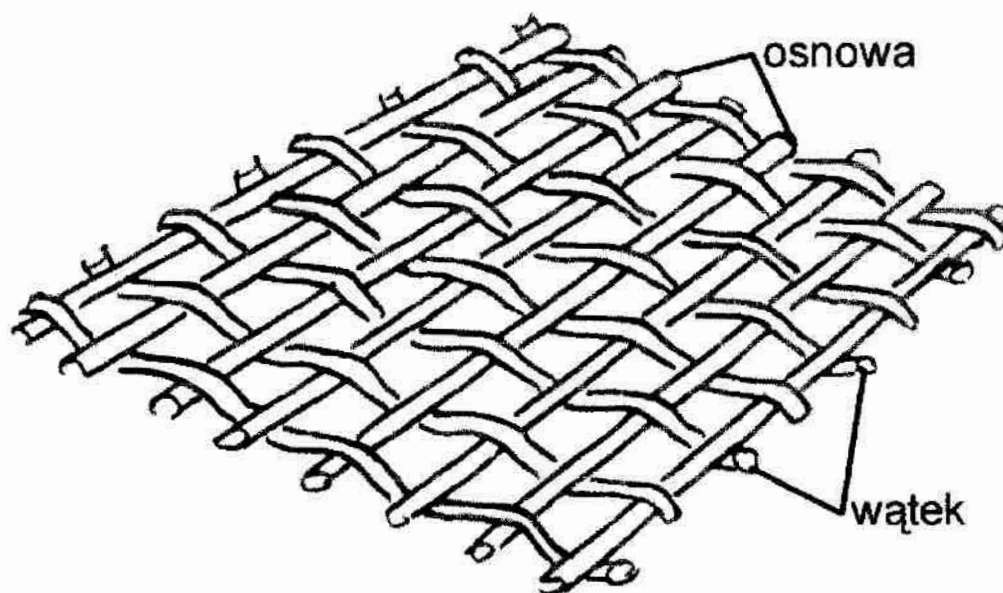
Przykładowe właściwości mechaniczne różnych typów tkanin zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1.

Rodzaj włókna / typ powleczenia	Ciężar	Wytrzymałość na zerwanie, osnowa / wątek	Wydłużenie przy zerwaniu, osnowa / wątek	Wytrzymałość na ścinanie
	G/m ²	N/5cm	%	N
Poliester / PCV				
Typ 1	800	3000/3000	15/20	350
Typ 2	900	4400/3950	15/20	580
Typ 3	1050	5750/5100	15/25	950
Typ 4	1300	7450/6400	15/30	1400
Typ 5	1450	9800/8300	20/30	1800
Włókno szklane	800	3500/3000	7/10	300
/ Teflon	1270	6600/6000	7/10	570
Aramid / PCV	900	8000/7000	5/6	700
	2020	24500/24500	5/6	4450
Teflon /-	520	2000/2000	30/40	500
Bawełna /-	350	1700/1000	18/35	60
Poliester /-	520	2500/2000	20/38	80

Na materiał pokrywający tkaninę najczęściej używane są termoplasty, takie jak polichlorek winylu (PCV), czy policzterofluoroetylen (teflon) lub elastomery jak poli-chloropren.

Badania właściwości mechanicznych. Podstawowymi i najczęściej badanymi właściwościami mechanicznymi tkanin powlekanych są wytrzymałość na zerwanie oraz wydłużenie przy zerwaniu. Parametry te określane są w badaniach doraźnych krótkotrwałych. Wyniki tych badań dla różnych typów tkanin prezentowane są w pracach [19], [20], [37], [41]. Należy podkreślić, że wytrzymałość na zerwanie materiałów tekstylnych silnie zależy od rodzaju zastosowanego włókna. Istnieje pełna analogia otrzymanych wyników badań dla tkaniny oraz pojedynczych włókien, z których wykonana jest tkanina, co wykazano w pracy [41]. Tkaniny tekstylne posiadają właściwości anizotropowe najbardziej zbliżone do ortotropowych, nawet, jeżeli wątek i osnowa są wykonane z jednakowych nici. Fakt ten podkreślany jest we wszystkich publikacjach dotyczących badań materiałów tekstylnych, dla przykładu podać tu można publikacje [18], [48]. Anizotropia ta związana jest z różnym stopniem skrzywienia nici wątku, a często i osnowy, oraz niejednakowym napięciem nici na obu kierunkach, podczas tkania materiału, rys.1.6. Kierunki ortotropii zgodne są z kierunkami osnowy i wątku najczęściej ułożonymi pod kątem prostym do siebie. Natomiast w odróżnieniu od typowych materiałów ortotropowych w trakcie deformacji kąt między wątkiem i osnową może się zmieniać.



Rys.1.6. Układ nici tkaniny tekstylnej

W związku z powyższym, rzadko można spotkać prace, takie jak [20], [41], [48], prezentujące badania prowadzone w stanie dwuosiowego napięcia. Istnieją też kłopoty z zastosowaniem zawartych tam rezultatów w praktyce, gdyż trudno jest zapewnić w całym przekroju rozkład sił zgodny z tym z prac laboratoryjnych. W cytowanych

powyżej pracach autorzy podkreślają, że wytrzymałość i wydłużenia w dwuosowym stanie deformacji są mniejsze, niż w przypadku badań jednoosiowych. Spadek ten jest różny i zależy jest od rodzaju włókien badanej tkaniny oraz od stosunku sił na kierunku osnowy i wątku. Dla tkanin poliestrowych spadek ten wynosi w granicach 15 – 20%.

Tkaniny tekstylne charakteryzują się silną nieliniowością materiałową, wyraźnie widoczną w trakcie prób rozciągania i zmieniającą się w czasie. Zatem należą do grupy materiałów reagujących na wpływ czasu obciążania i przy opisie tych materiałów należy uwzględnić takie zjawiska jak pełzanie i relaksacja. Fakt ten potwierdzają publikacje [20], [21], [26]. Metodykę prowadzenia eksperymentów na próbkach w celu wyznaczenia lepkoplastycznych parametrów materiałowych można znaleźć w pracach [11], [32], [55].

1.3. Lepkoplastyczne związki konstytutywne oraz ustalanie ich parametrów

Rozwój komputerów oraz powszechny do nich dostęp spowodował, że znaczenia nabrały metody obliczeniowe oparte na zaawansowanych modelach teoretycznych. Początkowo realizacja tych obliczeń odbywała się przy wykorzystaniu metody różnic skończonych, a później i obecnie głównie metody elementów skończonych. Częściej i swobodniej zaczęto stosować nieliniowe modele praw konstytutywnych. Rozwój maszyn obliczeniowych zlikwidował także problemy dotyczące swobody kształtowania konstrukcji. Rozdziały dotyczące zjawisk lepkoplastycznych są obecnie głównym tematem zainteresowania w pracach poświęconych mechanice ciała stałego. Jednak podstaw analizy konstrukcji należy szukać w ogólnych sformułowaniach mechaniki ośrodka ciągłego, pozycje [23], [50], [51].

Niestety rozwój komputerów nie rozwiązał problemów dotyczących identyfikacji parametrów materiałowych oraz doboru odpowiedniej techniki eksperymentu. Osobny problem stanowi możliwość wykorzystania zaawansowanych systemów obliczeniowych typu ABAQUS [1], gdzie użytkownik może dodawać własne moduły obliczeniowe i materiałowe. Jednak proces ten jest skomplikowany i wymaga dużego doświadczenia, na co zwracają uwagę autorzy pracy [30]. Przykłady obliczeń systemem ABAQUS można znaleźć w publikacjach [3], [39].

Należy podkreślić, że obecnie dostępnych jest wiele monografii dotyczących zagadnień lepkoplastycznych. Jednak początkowo informacje na ten temat ukazywały się w większości tylko jako artykuły prezentowane w materiałach konferencyjnych lub

w niedostępnych wewnętrznych raportach. W polskiej literaturze związanej z tą tematyką obszerną prezentację prac i teorii praw lepkoplastycznych zawierają monografie [43], [44]; natomiast w literaturze obcej można wymienić pracę [38].

Jakość uzyskiwanych wyników w analizie konstrukcji w ogromnym stopniu zależy od opisu właściwości materiałowych. Konieczne jest zatem skorzystanie z badań z zakresu teorii plastyczności [15] i lepkoplastyczności [43]. Sposoby przeprowadzania podstawowych badań w celu ustalania parametrów materiałowych omówiono w pracach [11], [55]. Opisane tam metody badawcze odnoszą się jednak tylko do próbek i nie uwzględniają wielu aspektów badań nad strukturami złożonymi. Ze względu na duże trudności w prowadzeniu badań w złożonym stanie naprężenia, badacze analizują głównie stan jednoosiowy. Podejście takie ułatwia prowadzenie doświadczeń i interpretację uzyskanych wyników. Jednak by udowodnić słuszność przeprowadzonych identyfikacji na podstawie badań w stanie jednoosiowym, należy przeprowadzić także badania w złożonym stanie naprężenia, co podkreślone zostało w pracach [32], [44]. Interesujące porównania wyników doświadczalnych i wyprowadzeń teoretycznych dotyczących odkształceń plastycznych, wpływu prędkości odkształcenia plastycznego oraz właściwości materiałowych, znaleźć można w pracach [13], [25], [29], [43], [44]. W pozycjach tych można się zapoznać zarówno z podstawowymi modelami materiałowymi oraz prześledzić metodykę najczęściej wykonywanych testów eksperymentalnych.

Szczególnie istotne ze względu na ogromny wkład w rozwój opisu zagadnień sprężysto lepkoplastycznych są monografie [43], [44]. W pracach tych przedstawiono szereg nowych rozwiązań opartych na mocnych podstawach teoretycznych. Są to podstawowe pozycje literaturowe, stanowiące fundament dzisiejszej lepkoplastyczności nie tylko w Polsce. Sformułowania zawarte w tych monografiach rozwinęły się w prawo zwane dzisiaj prawem Perzyny. Model ten stanowił punkt wyjścia dla wielu innych badaczy do rozbudowy własnych modeli materiałowych (wzbogaconych między innymi o opis wzmocnień), do których między innymi należy model Chaboche'a [14], [38], zastosowany w niniejszej pracy.

Zestawienia różnych modeli lepkoplastycznych zawarte są w pracach [47], [59], [60]. W modelach tych w większości wykorzystywane są warunki plastyczności według hipotezy Treski lub Hubera-Misesa-Hencky'ego, nieliczne operują dynamicznym warunkiem jak prace Campbella [13] lub Perzyny [43]. Powszechnie stosowane jest stowarzyszone prawo płynięcia oraz wzmocnienie izotropowe. Wiele modeli odwołuje się

w swoich sformułowaniach do sprawdzonych modeli teoretycznych: Cowpera-Symondsa [16], Chaboche'a [14], Bodnera-Partoma [8], Johnsona-Cooka [28].

Wyraźny w ostatnich latach postęp w modelowaniu materiałowym widoczny jest na przykładzie publikacji [47].

Ogromnie ważne jest, że badacze nie ustają w wykonywaniu doświadczeń ukierunkowanych na stworzenie bazy do opracowywania wciąż nowych modeli praw konstytutywnych, czy też identyfikacji parametrów istniejących już modeli materiałowych.

2. Doświadczenia doraźne

Konstrukcje wiszące, jak i otwarte zadaszenia wykonane z lekkich powierzchni nośnych stabilizowanych przez różne formy ograniczające je, poddane są obciążeniom zewnętrznym, takim jak napięcie membrany, woda, wiatr, a czasem i śnieg. Bez znajomości podstawowych właściwości materiału tekstylnego, takich jak wytrzymałość i wydłużenie przy zerwaniu, realizowanie tych obiektów jest niemożliwe. Ważna jest zarówno wytrzymałość pokrycia i konstrukcji nośnej (napinającej) oraz zapas wytrzymałości. Pełne wykorzystanie wytrzymałości tych konstrukcji będzie możliwe dopiero po dokładnych badaniach laboratoryjnych.

Testom poddano powlekany materiał tekstylny PANAMA firmy Sattler wykonany z tkaniny poliestrowej (PES według DIN 60 001) o splocie nici P 2/2 (według DIN 61 101) pokrytej obustronnie polichlorkiem winylu. Tkanina wykonana jest z jednakowych nici oraz posiada jednakowe zagęszczenie tych nici na kierunku wątku i osnowy. Gęstość tkaniny wynosi 275 g/m^2 , natomiast łącznie z pokryciem 870 g/m^2 . Wytrzymałość na rozciąganie producent ustalił na 4200 N/5cm w kierunku osnowy i 4000 N/5cm w kierunku wątku. Siła rozdierająca wynosi 550 N w kierunku osnowy i 500 N w kierunku wątku. Producent gwarantuje odporność wyrobu na temperaturę w zakresie niskich temperatur do $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, a wysokich do $+70 \text{ }^\circ\text{C}$. Podane przez producenta dane materiałowe są istotną informacją dla projektanta chcącego zorientować się na temat głównych cech materiału. Niestety są niewystarczające dla konstruktora pragnącego wykonać obliczenia wytrzymałościowe zadaszenia wykonanego z materiału tekstylnego. Pierwszym krokiem w celu uzyskania dokładniejszych danych materiałowych jest przeprowadzenie doraźnych testów jednoosiowego rozciągania próbek materiału.

Do przeprowadzenia badań doraźnych wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick 147670 (rys. 2.1). Podłogowa maszyna wytrzymałościowa Zwick 147670 posiada klasę 0/0.5 jakości pomiaru siły, natomiast ze względu na zastosowaną głowicę pomiarową klasę 1. Maszyna ta posiada dwa zakresy pomiarowe: pierwszy do 100 kN oraz drugi do 5 kN . Ten właśnie mniejszy zakres został wykorzystany do przeprowadzenia badań. Bezluzowe prowadzenie i napęd trawersy za pomocą przekładni śrubowo-tocznej oraz maksymalnie sztywna rama obciążeniowa eliminują niekorzystny wpływ całego systemu pomiarowego na dokładność badań. Istnieje możliwość regulacji prędkości ruchu trawersy w zakresie 0.001 do 1000 mm/min z dokładnością ustawienia prędkości 0.5% i rozdzielczością drogi trawersy równą $0.126 \text{ } \mu\text{m}$. Zastosowana elek-

tronika pomiarowa i sterująca pozwala na częstość próbkowania 400 Hz oraz częstość transmisji danych do komputera 50 Hz. Korekcja punktu zera odbywa się automatycznie podczas rozpoczęcia pomiaru. Zestaw pomiarowy zaopatrzony jest również w oprogramowanie komputerowe ułatwiające rejestrację wyników badań.



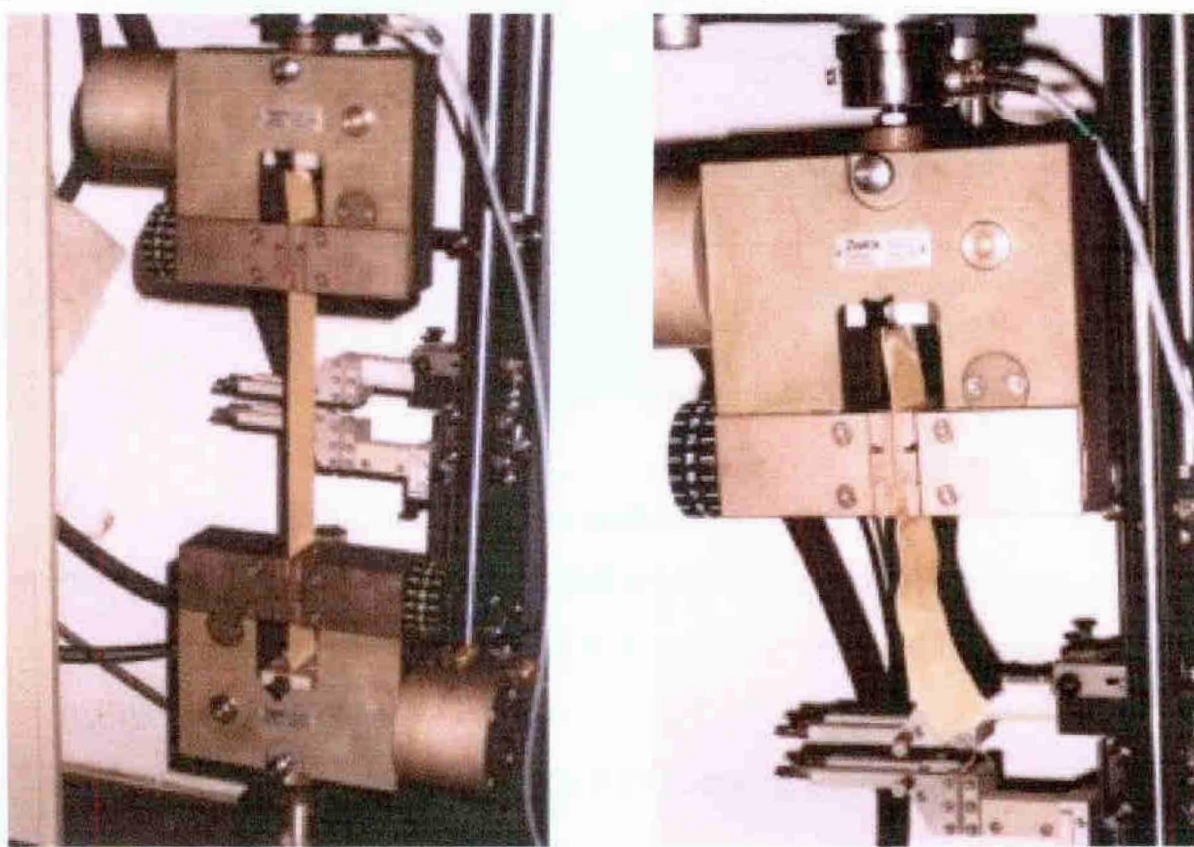
Rys. 2.1. Maszyna wytrzymałościowa Zwick 147670

2.1. Opis doświadczeń

Podczas prowadzenia badań wytrzymałościowych istotne jest uwzględnienie wszystkich parametrów mających bezpośredni wpływ na uzyskiwane wartości. Do najważniejszych parametrów należą: warunki klimatyczne powietrza, długość zakleszczenia i wymiary próbki oraz prędkość rozciągania próbki.

Próby jednoosiowego rozciągania przeprowadzono przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick 147670 opisanej w rozdziale 2, rejestrując komputerowo obciążenie, przemieszczenie oraz czas. Testy prowadzono przy różnych prędkościach odkształcenia: 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , $5 \cdot 10^{-3}$ i $1.67 \cdot 10^{-3}$ 1/s w warunkach klimatu normalnego. Wymiary próbek do testów przyjęto, mając na uwadze wytyczne do badań materiałów włókienniczych [57], normy [45], [46] oraz wskazówki zawarte w pracach [22], [48]. Przyjęto: szerokość próbki 50 ± 0.5 mm oraz długość próbki (rozstaw uchwytów mocu-

jących w świetle) 200 ± 0.5 mm (rys. 2.2). Należy podkreślić, że brak jest jakichkolwiek polskich przepisów i norm ukierunkowujących badania wytrzymałościowe materiałów tekstylnych do celów budowlanych. Podstawową zasadą przy pobieraniu próbek do badań jest zachowanie jednorodności partii materiału. W partii jednorodnej odchylenia wartości badanych mają charakter przypadkowy. Dlatego też próbki wycięto wzdłuż (osnowa) i w poprzek (wątek) tej samej rolki materiału. Przed przystąpieniem do badań przetestowano jakość zakleszczenia badanego materiału w uchwytach mocujących. Przedstawione na rys. 2.2 elementy mocujące posiadają zmienną, regulowaną siłę docisku szczęk w zakresie od 0 do 6 bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$). Oryginalne szczęki będące standardowym wyposażeniem maszyny wytrzymałościowej posiadały powierzchnię gładką – ryflowaną. Wykonano również dodatkowe szczęki o powierzchni falistej.



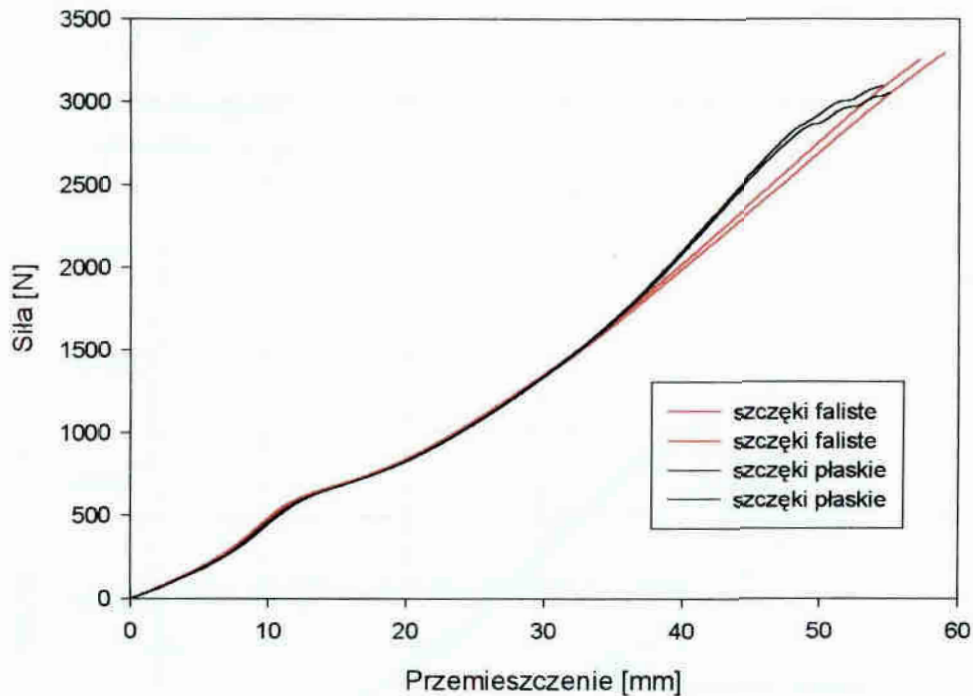
a) uchwyt mocujący próbkę

b) próbka po zerwaniu

Rys. 2.2. Mocowanie próbek w szczękach

Przeprowadzone próby wykazały lepsze zakleszczenie badanego materiału przy zastosowaniu szczęk falistych (rys. 2.3). Do badań zastosowano szczęki faliste oraz siłę docisku równą 6 bar. Należy podkreślić, że zastosowane zamocowanie próbek materiału tekstylnego PANAMA nie miało wpływu na uszkodzenie próbek w miejscu zakleszczenia. Wszystkie testowane próbki zrywały się w środkowej części bazy pomiarowej (rys. 2.2.b). Badania przeprowadzono w klimacie normalnym zgodnie z zaleceniami

zawartymi w pozycji [57], któremu odpowiada powietrze o następujących parametrach: temperatura powietrza $T = 20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$, a wilgotność względna $\varphi = 65 \pm 2\%$. Utrzymanie tych parametrów było możliwe poprzez aklimatyzowanie próbek oraz prowadzenie badań w pomieszczeniu klimatyzowanym.

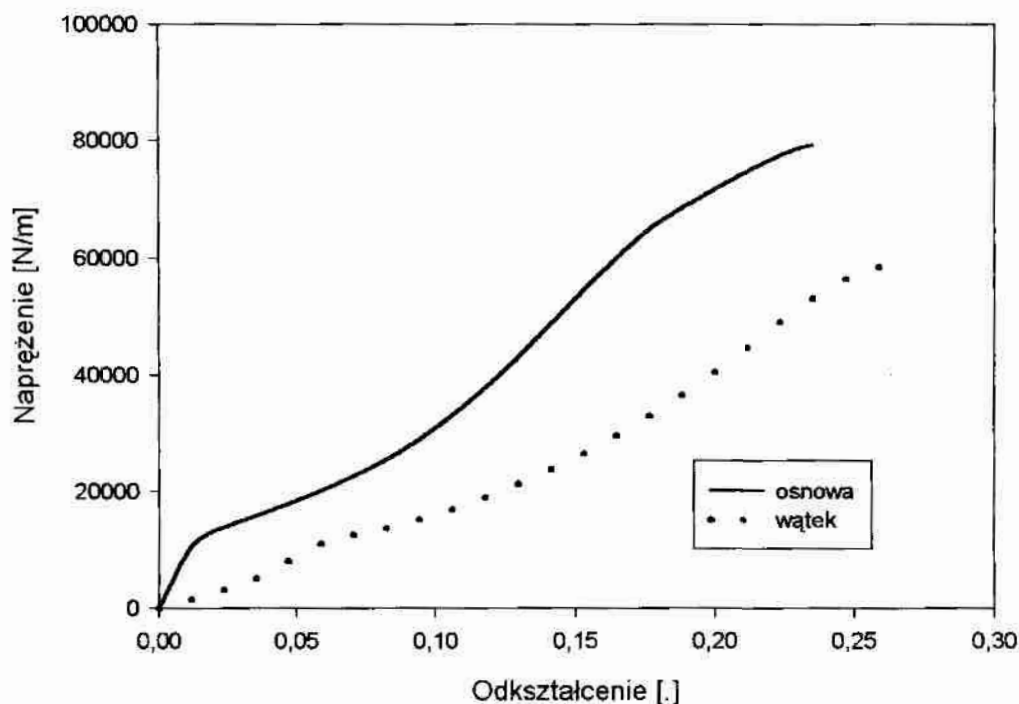


Rys. 2.3. Wpływ rodzaju szczęk na otrzymane wyniki

Zrealizowano następujący program badań:

- próbki rozciągane ze stałą prędkością odkształcenia na kierunku osnowy,
 - a) próbki rozciągane z prędkością 0.002 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-5} 1/s) do odkształcenia 3% - 10 prób,
 - b) próbki rozciągane z prędkością 0.02 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-4} 1/s) do odkształcenia 5% - 10 prób,
 - c) próbki rozciągane z prędkością 0.2 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-3} 1/s) do odkształcenia 5% - 10 prób,
 - d) próbki rozciągane z prędkością 1.0 mm/s (prędkość odkształcenia $5 \cdot 10^{-3}$ 1/s) do zerwania - 10 prób,
 - e) próbki rozciągane z prędkością 0.3 mm/s (prędkość odkształcenia $1.67 \cdot 10^{-3}$ 1/s) do zerwania - 2 próby,
- próbki rozciągane ze stałą prędkością odkształcenia na kierunku wątku,

- a) próbki rozciągane z prędkością 0.002 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-5} 1/s) do odkształcenia 20% - 6 prób,
- b) próbki rozciągane z prędkością 0.02 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-4} 1/s) do odkształcenia 20% - 6 prób,
- c) próbki rozciągane z prędkością 0.2 mm/s (prędkość odkształcenia 10^{-3} 1/s) do zerwania - 6 prób,
- d) próbki rozciągane z prędkością 1.0 mm/s (prędkość odkształcenia $5 \cdot 10^{-3}$ 1/s) do zerwania - 6 prób,



Rys. 2.4. Typowe krzywe rozciągania tkaniny PANAMA

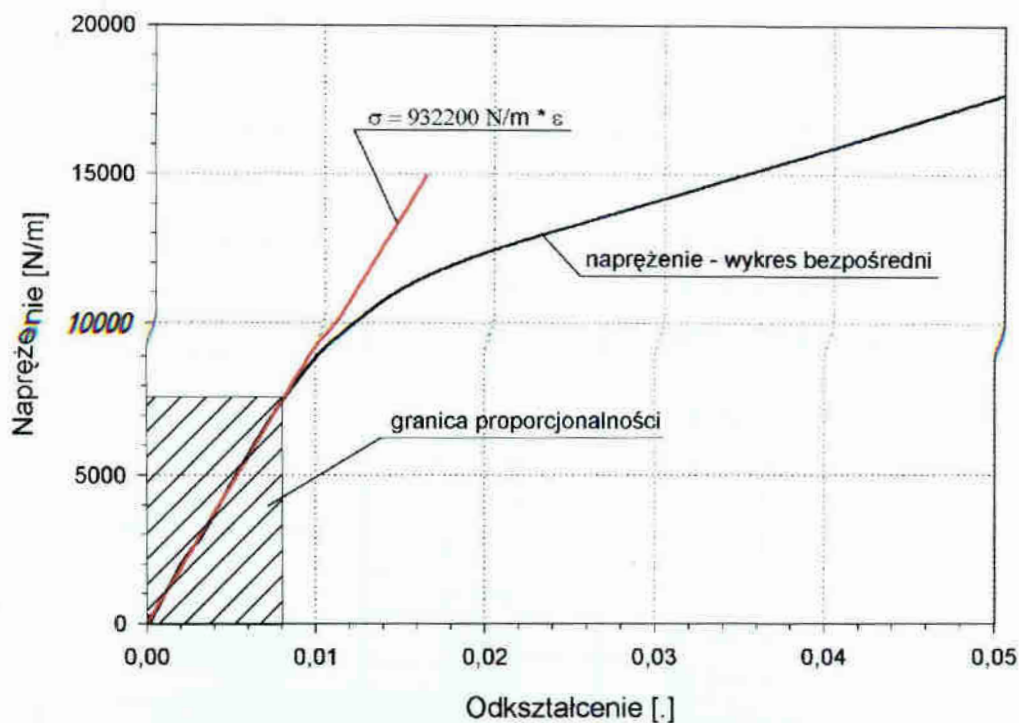
Analiza przedstawionych na rys. 2.4 krzywych napężenie – odkształcenie wykazuje, że mimo jednakowego zagęszczenia nici na kierunku wątku i osnowy, wydłużenia i moduły sprężystości w tych kierunkach są różne. Wynika to z różnego napięcia i skarbowania nici w tych kierunkach w procesie tkackim. Jednocześnie należy podkreślić fakt, że podane przez producenta wytrzymałości na rozciąganie okazały się w przeprowadzonych badaniach niższe na kierunku osnowy o ok. 2 %, a na kierunku wątku o ok. 10 %.

Wyniki opisanych powyżej badań laboratoryjnych posłużą do określenia sprężystych jak i niesprężystych właściwości mechanicznych tkaniny powlekanej typu PANAMA.

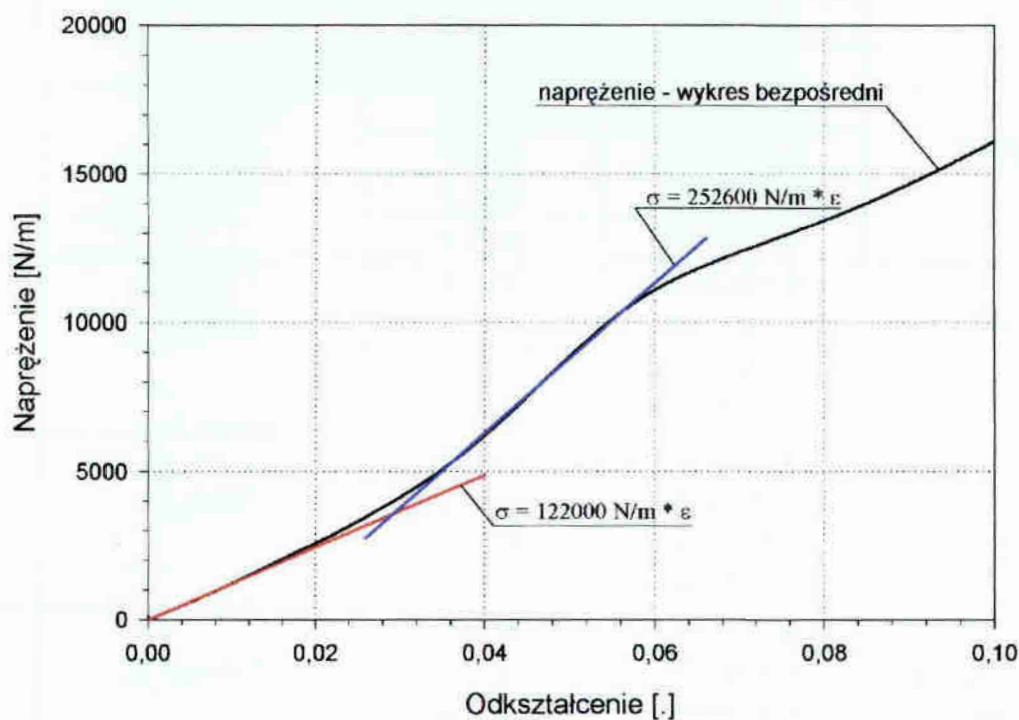
2.2. Identyfikacja sprężystych parametrów materiału

Identyfikację modułu sprężystości podłużnej - Younga E przeprowadzono osobno dla wyników doświadczalnych otrzymanych na kierunku wątku i osnowy. Opis doświadczenia przedstawiono w rozdziale 2.1. Do analizy brano próby z prędkością odkształcenia 10^{-4} , 10^{-3} , $5 \cdot 10^{-3}$, $1,67 \cdot 10^{-3}$ 1/s dla kierunku osnowy oraz 10^{-4} , 10^{-3} , $5 \cdot 10^{-3}$ 1/s dla kierunku wątku. Próby z prędkością odkształcenia 10^{-5} 1/s zarówno na kierunku osnowy i wątku pominięto ze względu na długi czas trwania próby i możliwe zniekształcenie otrzymanych wyników w części sprężystej poprzez pełzanie materiału. Wyniki identyfikacji przedstawiono w tabeli 2.1 i 2.2. Identyfikację modułu Younga E dla kierunku osnowy przeprowadzono w zakresie odkształcenia ε od 0.000 do 0.008, gdyż w tym zakresie wykres odkształcenie – naprężenie ma charakter liniowy rys. 2.5. Fakt ten potwierdzają również przeprowadzone próby pełzania przedstawione w rozdziale 3. Natomiast dla kierunku wątku zidentyfikowano dwa moduły Younga E , pierwszy w zakresie odkształceń od 0.000 do 0.008 i drugi moduł od 0.035 do 0.050. Postępowanie takie wynika z analizy wykresu odkształcenie – naprężenie, rys. 2.6. Należy pamiętać, iż w procesie produkcji tkaniny tekstylnej powlekaney kierunek osnowy jest napięty, natomiast nici wątku są przeplatane. Fakt ten doskonale obrazuje rys. 1.6. Wobec tego w trakcie próby rozciągania na kierunku wątku początkowo obserwujemy pracę tylko materiału powleczenia (polichlorek winylu), po czym następuje napięcie nici wątku oraz stopniowe włączanie się ich do pracy.

Przyjęto także kryterium uznania danego wyniku identyfikacji modułu Younga E za możliwy do zaakceptowania. Kryterium tym jest przedział wartości o szerokości $\pm 10\%$ obliczonej wartości średniej. Próby dające wartości niezawierające się w tym przedziale wykluczano z obliczeń średniej wartości modułu sprężystości podłużnej i dalszej identyfikacji.



Rys. 2.5. Identyfikacja modułu odkształcalności podłużnej E dla kierunku osnowy



Rys. 2.6. Identyfikacja modułu odkształcalności podłużnej E dla kierunku wątku

Należy pamiętać, że badany materiał PANAMA jest niejednorodny i duży wpływ, szczególnie na jego właściwości sprężyste, ma materiał powlekający tkaninę. Z pewnością dodatkowych informacji mogłoby dostarczyć badanie samego materiału tekstylnego bez powleczenia. Takie badanie pozwoliłoby na pewno dokładniej poznać zachowanie się tkaniny na kierunku wątku i upewnić się, co do przyjętego modułu Younga E na tym kierunku. Niestety autorowi nie udało się otrzymać takich próbek materiału PANAMA do badań.

Tabela 2.1

Parametry sprężyste dla próbek rozciąganych w kierunku osnowy

Lp	Numer próby	ε	E	$R_{0,2}$
		[.]	[N/m]	[N/m]
1	B_os10	0.004	889517.6	9714.2
		0.006	900219.1	
		0.008	893316.3	
		0.010	865020.2	
2	B_os13	0.004	916524.1	10432.6
		0.006	938660.7	
		0.008	931923.2	
		0.010	901792.2	
3	B_os20	0.004	826278.0	9112.5
		0.006	858997.8	
		0.008	869685.1	
		0.010	851868.4	
4	B_os21	0.004	866224.6	9435.9
		0.006	886834.8	
		0.008	888153.0	
		0.010	863480.7	
5	B_os22	0.004	837286.6	9172.8
		0.006	863623.8	
		0.008	871124.3	
		0.010	851809.0	
6	B_os23	0.004	904220.6	9841.3
		0.006	902609.3	
		0.008	900148.4	
		0.010	873518.8	
7	B_os24	0.004	933098.6	10396.6
		0.006	948896.3	
		0.008	944073.9	
		0.010	912438.3	
8	B_os41(*)	0.004	745321.8	nie identyfiko- wano
		0.006	777480.3	
		0.008	797870.7	
		0.010	789423.0	
9	B_os42(*)	0.004	778158.7	nie identyfiko- wano
		0.006	765975.9	
		0.008	794187.0	
		0.010	795841.0	
10	C_os11	0.004	925800.5	10615.0
		0.006	939332.8	
		0.008	932950.3	
		0.010	886636.6	
11	C_os12	0.004	957232.8	11195.9
		0.006	968816.6	
		0.008	961314.4	
		0.010	911171.4	

Tabela 2.1 cd.

Lp	Numer próby	ε	E	$R_{0,2}$
		[.]	[N/m]	[N/m]
12	C_os17	0.004	957864.7	10912.0
		0.006	968859.2	
		0.008	964678.6	
		0.010	937230.7	
13	C_os18	0.004	933209.1	11135.0
		0.006	957557.9	
		0.008	955189.8	
		0.010	931219.6	
14	C_os19	0.004	882050.4	11003.8
		0.006	906764.3	
		0.008	924629.2	
		0.010	915202.8	
15	C_os25	0.004	930578.1	10933.8
		0.006	946885.1	
		0.008	943950.8	
		0.010	917136.0	
16	C_os26	0.004	934558.0	11036.4
		0.006	953952.3	
		0.008	951971.7	
		0.010	926071.2	
17	C_os27	0.004	936821.1	11018.6
		0.006	965956.4	
		0.008	960848.0	
		0.010	930449.2	
18	D_os28	0.004	969292.5	12535.1
		0.006	989243.8	
		0.008	996480.8	
		0.010	973677.9	
19	D_os29	0.004	959020.5	12007.4
		0.006	986460.7	
		0.008	985726.4	
		0.010	958173.9	
20	D_os30	0.004	951047.2	11670.6
		0.006	965900.0	
		0.008	966731.3	
		0.010	942829.8	
21	D_os31	0.004	983648.5	12087.7
		0.006	998020.8	
		0.008	993072.5	
		0.010	964250.7	
22	D_os37(*)	0.004	788083.0	9890.0
		0.006	826892.8	
		0.008	852700.0	
		0.010	849176.3	

Tabela 2.1 cd.

Lp	Numer próby	ε	E	$R_{0,2}$
		[.]	[N/m]	[N/m]
23	D_os38	0.004	840901.6	9499.0
		0.006	867668.7	
		0.008	869328.6	
		0.010	848702.6	
24	D_os08	0.004	960499.2	nie identyfikowano
		0.006	964003.6	
		0.008	956986.8	
		0.010	909322.1	
25	E_os01	0.004	897709.1	10100.0
		0.006	907609.2	
		0.008	907022.7	
		0.010	871274.0	
26	E_os09	0.004	957064.6	11000.0
		0.006	961160.0	
		0.008	950870.1	
		0.010	892210.6	

(*) – próby odrzucone podczas identyfikacji modułu Younga

Przyjęto $E_{sr} = 932200$ N/m ($E=932.2$ kN/m) identyfikując w przedziale odkształceń ε 0.000 do 0.008.

Tabela 2.2

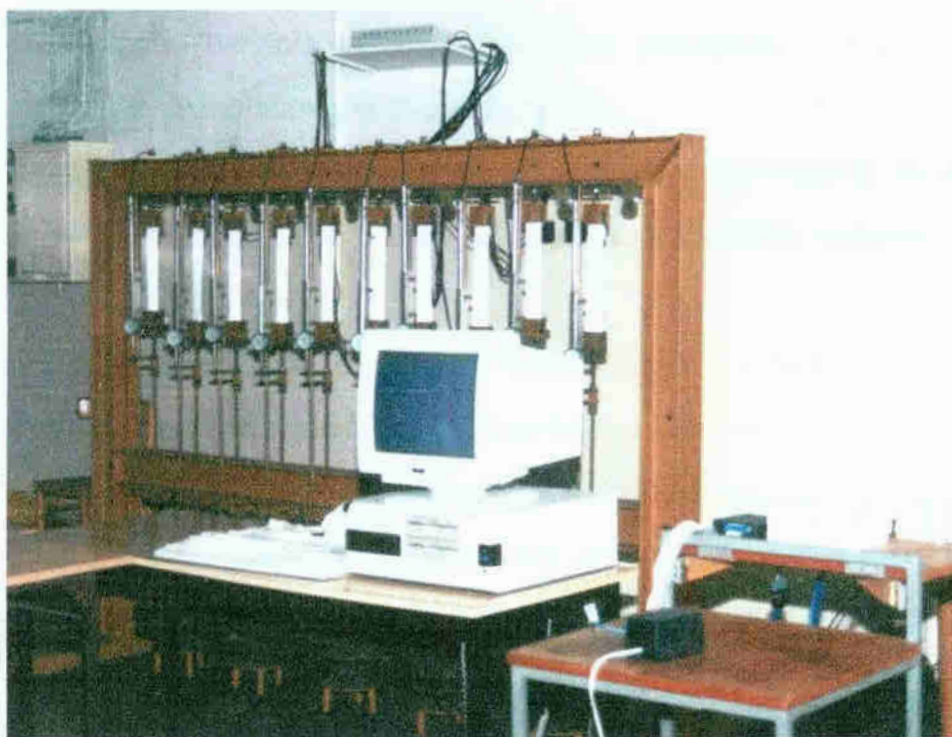
Moduł Younga dla próbek rozciąganych w kierunku włuku

Lp	Numer próby	E (0.000-0.008)	E (0.035-0.050)
		[N/m]	[N/m]
1	B_w09	100342.2	239537.2
2	B_w15	103341.5	243678.3
3	B_w16	107845.9	254397.2
4	B_w17	103251.8	246646.2
5	C_w04	165521.8	251994.9
6	C_w05	127930.9	265099.6
7	C_w06	119935.6	256496.3
8	C_w07	120292.8	256708.3
9	C_w08	113107.3	240392.9
10	D_w02	131790.9	270175.8
11	D_w03	127723.8	271086.0
12	D_w10	120912.8	249470.1
13	D_w11	120195.7	245443.5
14	D_w12	118186.3	249504.8
15	D_w13	123904.6	258663.1
16	D_w14	126102.5	259398.6

Przyjęto $E_{sr-1} = 122000$ N/m ($E_1=122.0$ kN/m) identyfikując w przedziale odkształceń ε 0.000 do 0.008 oraz $E_{sr-2} = 252600$ N/m ($E_2=252.6$ kN/m) identyfikując w przedziale odkształceń ε 0.035 do 0.05.

3. Doświadczenia reologiczne

Stanowisko do przeprowadzania badań w stanie jednoosiowego napięcia (rys.3.1) stanowi sztywna, pionowa rama stalowa. Próbki tkaniny w kształcie pasków o szerokości 50 ± 0.5 mm mocowane są w dwóch szczękach. Szczeka górna zawieszona jest na górnym ryglu ramy, dolna zaś połączona jest przegubowo z ramieniem dźwigni zamontowanej pod dolnym rygłem ramy. Próbki obciążane są obciążnikami talerzowymi, zawieszanymi na wieszakach mocowanych do ramienia dźwigni. Położenie dźwigni, która przez cały czas prowadzenia badań powinna być usytuowana poziomo, regulowane jest nakrętką znajdującą się na pręcie łączącym dolną szczękę z dźwignią. Na stanowisku tym można jednocześnie badać 10 próbek tkaniny o szerokości 50 mm i długości do 400mm.



Rys. 3.1. Stanowisko do badań pełzania

Pomiary i kontrolę wydłużeń przy badaniach reologicznych pełzania w stanie jednoosiowego napięcia przeprowadzono przy pomocy mechanicznych czujników zegarowych PSX - 50 o dokładności pomiaru ± 0.001 mm i zakresie pomiarowym 50 mm.

Rejestracja pomiarów odbywała się komputerowo przy użyciu systemu pomiarowego z mikroprocesorowym urządzeniem do automatycznego zbierania danych GEOLAB G5. Pomiaru wydłużeń dokonywano z jednoczesną kontrolą wilgotności i temperatury powietrza za pomocą termohigrografu. Obciążenie próbki wyznaczano wagowo z dokładnością do 0.01 N. Badania pełzania należy przeprowadzać w klimacie

normalnym, zgodnie z zaleceniami zawartymi w pozycji [57] (patrz str. 20). Utrzymanie tych parametrów w pomieszczeniu nieklimatyzowanym jest bardzo trudne. Ze względu na brak klimatyzacji postanowiono próby pełzania przeprowadzać w okresie zimowym (sezon grzewczy), aby utrzymać w miarę możliwości stałe warunki klimatyczne. W trakcie prowadzenia badań temperatura w pomieszczeniu badawczym wynosiła $T = 18 \pm 2^{\circ}C$, a wilgotność względna $\varphi = 70 \pm 2\%$. Wymiary próbek przyjęto, mając na uwadze wytyczne do badań materiałów włókienniczych [57] oraz wskazówki zawarte w pracach [19], [22]. Przyjęto: szerokość próbki 50 ± 0.5 mm oraz długość próbki (rozstaw uchwytów mocujących w świetle) 250 ± 0.5 mm.

Podczas pobierania próbek do badań zachowano jednorodność partii materiału tekstylnego i podobnie, jak w badaniach doraźnych, próbki wycięto wzdłuż (osnowa) oraz w poprzek (wątek) tej samej rolki materiału.

Przeprowadzono badania pełzania realizując następujący program obciążenia i odciążenia próbek w jednoosiowym stanie napięcia:

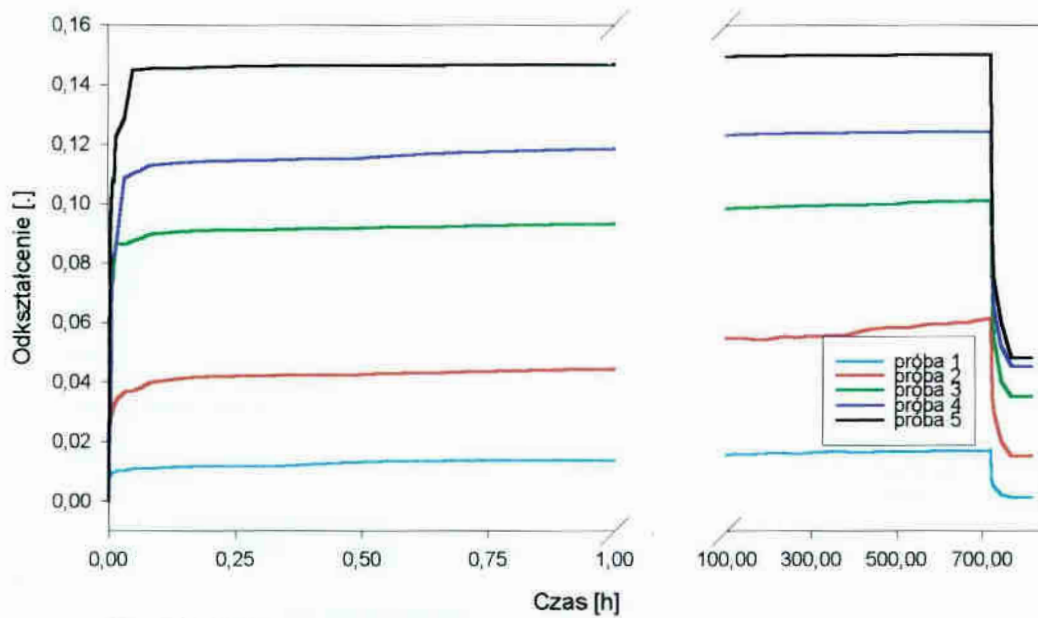
- obciążenie: 10%, 20%, 30%, 40%, 50% wartości siły zrywającej, na okres 30 dni (720 godz.) – pełne odciążenie 5 dni (120 godz.) na kierunku osnowy – po trzy testy,
- obciążenie: 10%, 20%, 30%, 40%, 50% wartości siły zrywającej, na okres 30 dni (720 godz.) – pełne odciążenie 5 dni (120 godz.) na kierunku wątku – po trzy testy.

W każdym teście pełzania przyjęto pięć wartości obciążeń. Wartości przyjętych obciążeń ustalono w zależności od wielkości siły zrywającej na kierunku wątku, podanej przez producenta tkaniny. Powyższe przyjęte wartości obciążenia próbek na obu kierunkach ilustruje tabela 3.1.

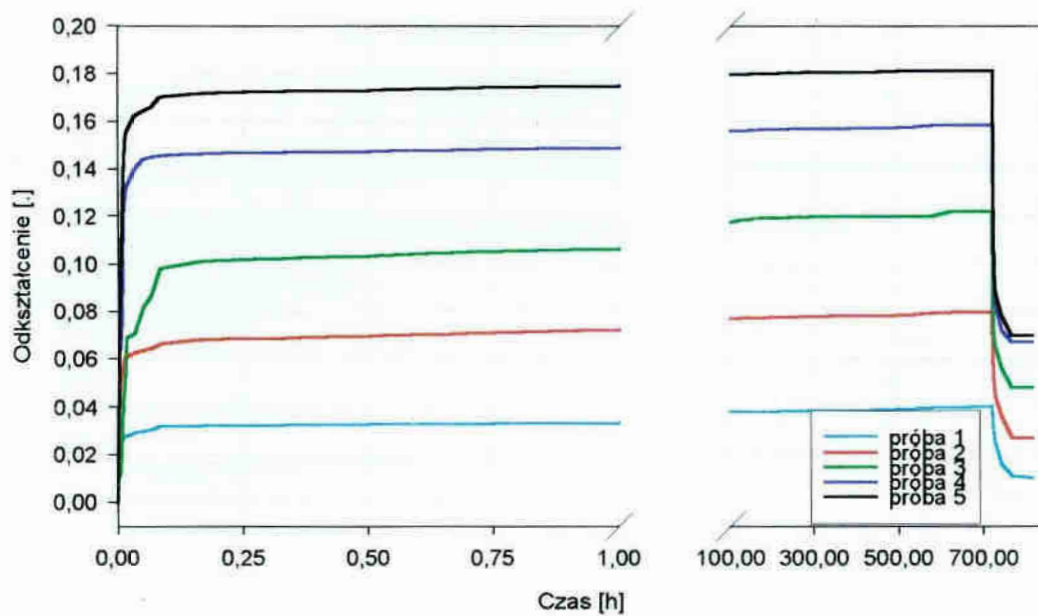
Tabela 3.1

Numer próbki	1	2	3	4	5
Procent siły zrywającej	10 [%]	20 [%]	30 [%]	40 [%]	50 [%]
Przyłożone obciążenie	40 [daN]	80 [daN]	120 [daN]	160 [daN]	200 [daN]

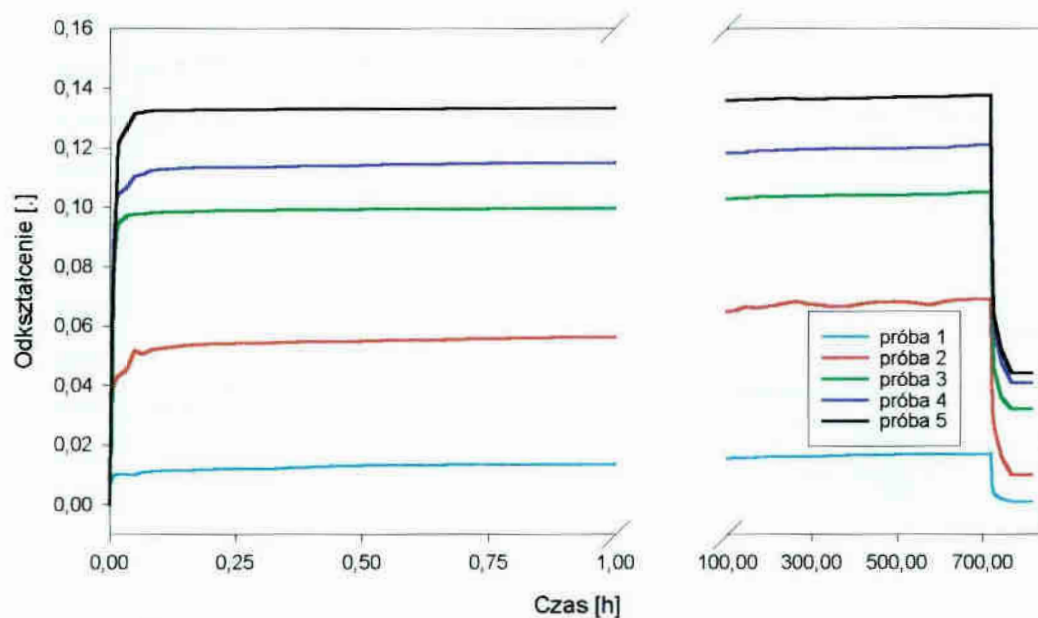
W każdej próbie badano stan jednoosiowy, wywołany obciążeniem działającym wzdłuż włókien wątku i osnowy. Wyniki przeprowadzonych badań ilustrują wykresy na rysunkach od rys. 3.2 do rys. 3.7.



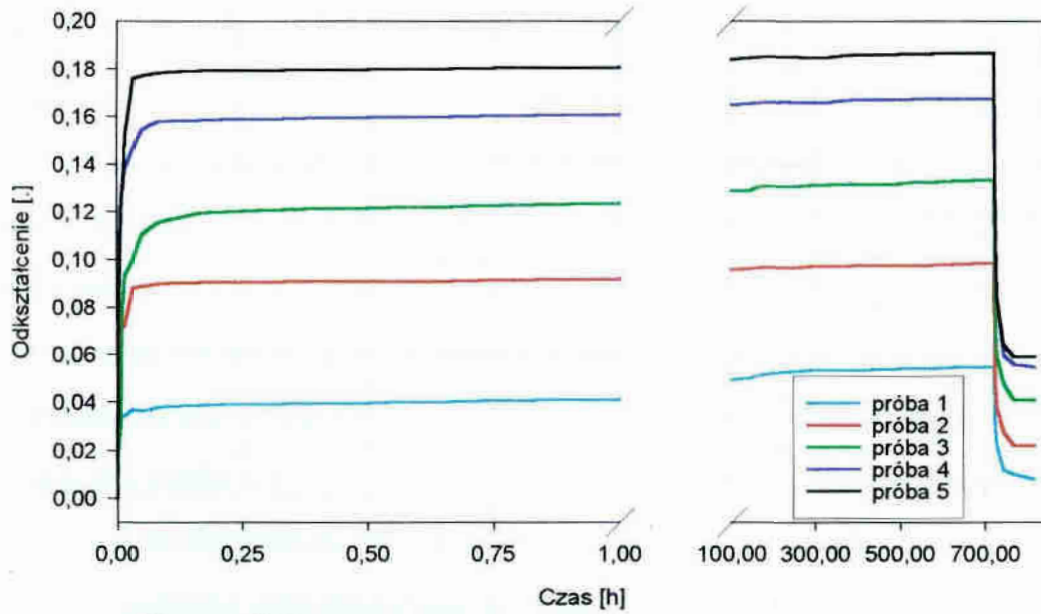
Rys. 3.2. Próby pełzania – kierunek osnowa – test pierwszy



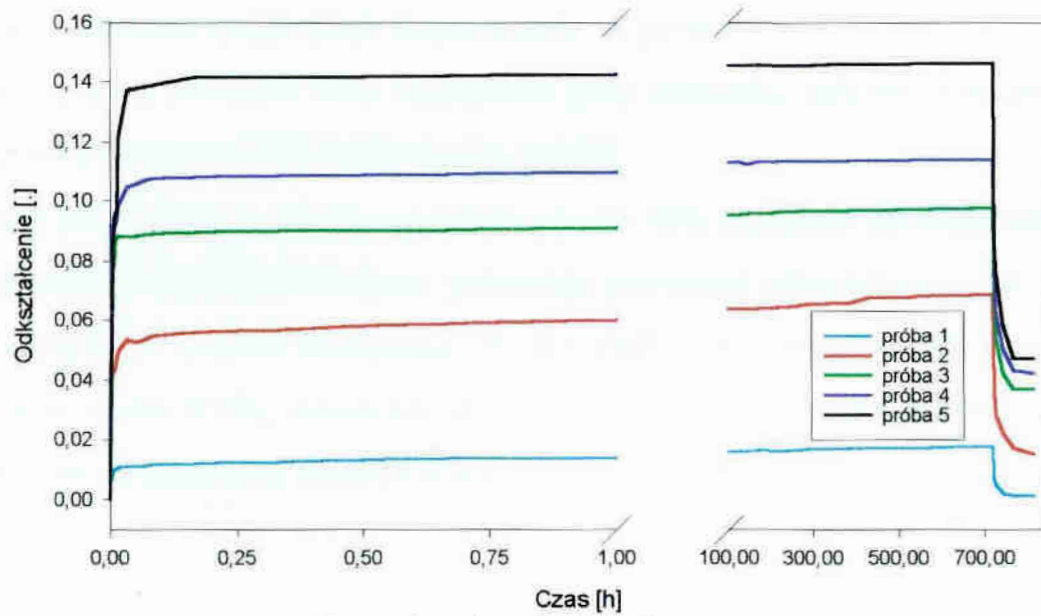
Rys. 3.3. Próby pełzania – kierunek wątek – test pierwszy



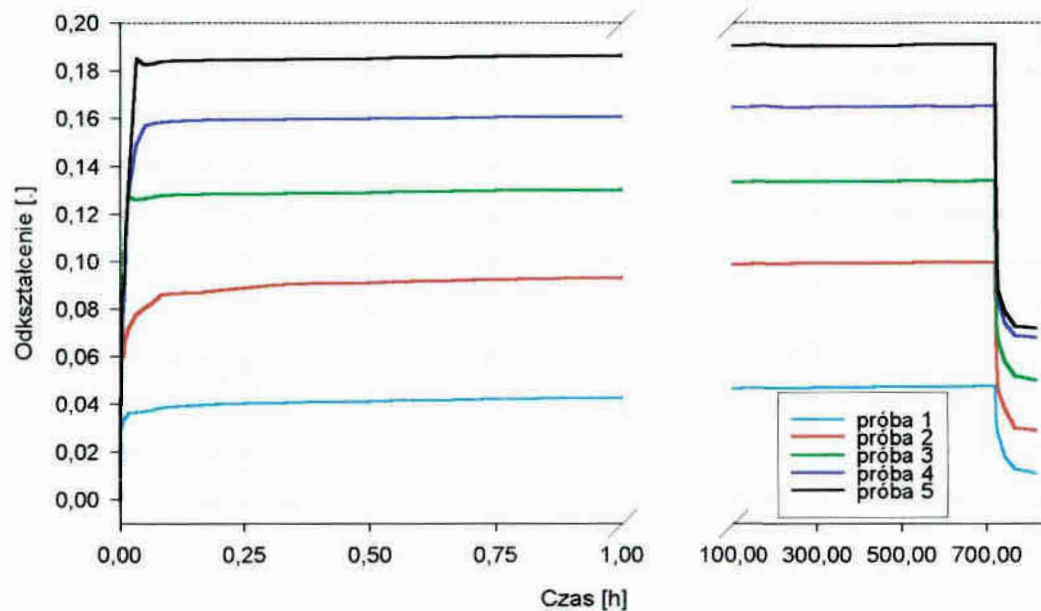
Rys. 3.4. Próby pełzania – kierunek osnowa – test drugi



Rys. 3.5. Próby pełzania – kierunek wątek – test drugi



Rys. 3.6. Próby pełzania – kierunek osnowa – test trzeci



Rys. 3.7. Próby pełzania – kierunek wątek – test trzeci

Analiza uzyskanych w testach krzywych pełzania przy stałej temperaturze i wilgotności, które przedstawiają zależność odkształcenia w funkcji czasu przy stałej wartości naprężenia w danej próbce, pozwala na następujące wnioski:

- badana tkanina powlekana, przy naprężeniach nie przekraczających 50% naprężenia przy zerwaniu, dla wątku i osnowy posiada wyraźne dwie fazy pełzania,
- pierwsza faza pełzania zawiera pierwszą część krzywej do momentu wystąpienia natychmiastowych odkształceń i stabilizacji prędkości odkształcenia, obejmuje ona zarówno dla wątku i osnowy okres około 0.5 godziny, charakteryzuje ją w początkowym okresie duża prędkość odkształcenia, która z czasem maleje,
- druga faza pełzania charakteryzuje się niską i ustabilizowaną prędkością odkształceń,
- badany materiał może mieć zastosowanie w przekryciach nawet do powstania w nim naprężeń równych 50% naprężenia przy zerwaniu, gdyż proces pełzania jest stabilny i nie prowadzi do zniszczenia próbki,
- należy podkreślić, że nawet naprężenia równe 10% naprężeń zrywających, zarówno na kierunku wątku jak i osnowy, powodują powstanie odkształceń trwałych, nie zanikających po ustaniu obciążenia. W przypadku osnowy są to odkształcenia niewielkie, około 0.1%, natomiast dla kierunku wątku wynoszą około 1% i jest to związane ze znacznym skarbowaniem nici wątku w procesie produkcji materiału.

4. Lepkoplastyczne związki konstytutywne

W rozprawie podjęto próbę zastosowania modelu ciała lepkoplastycznego do opisu zachowania się powlekanego materiału tekstylnego. Z wielu modeli lepkoplastycznych związków konstytutywnych zawartych np. w pracach [59], [60] wybrano dwa: Bodnera-Partoma i Chaboche'a. Lepkoplastyczne związki konstytutywne budowane są za pomocą równań różniczkowych, a zatem rozwiązanie ich wymaga odpowiedniej metody całkowania numerycznego. Całkowanie numeryczne wiąże się z zastosowaniem iteracji w trakcie obliczeń, co pociąga za sobą dobór odpowiedniej długości kroku całkowania. Ma to poważny wpływ na stabilność metody oraz problem sumowania się błędów. Należy pokreślić, że wszystkie modele lepkoplastycznych równań konstytutywnych zawierają dużą liczbę stałych materiałowych. Konieczne jest zatem przeprowadzenie badań laboratoryjnych w celu ich wyznaczenia.

4.1. Model Bodnera-Partoma

W modelu ciała lepkoplastycznego zaproponowanym przez Bodnera i Partoma w pracach [8], [9] prędkość odkształcenia niesprężystego opisana jest równaniem³⁾

$$\dot{\mathbf{E}}' = \frac{2}{3} \dot{p} \frac{\boldsymbol{\sigma}'}{J(\boldsymbol{\sigma}')} \quad (4.1)$$

gdzie: $\dot{\mathbf{E}}'$ jest tensorem prędkości odkształcenia niesprężystego,

$\boldsymbol{\sigma}'$ dewiatorem tensora naprężenia obliczanym jako

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - I_1(\boldsymbol{\sigma}) = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} \text{Tr}(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I} \quad (4.2)$$

$$\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma}) = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Występujący w (4.1) symbol $J(\boldsymbol{\sigma}')$ jest drugim niezmiennikiem dewiatora tensora naprężenia zwanym intensywnością naprężenia i obliczanym jako

$$J(\boldsymbol{\sigma}') = J(\sigma'^{ij}) = \left(\frac{3}{2} \sigma'^{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

³⁾ W rozdziałach 4.1 i 4.2 zwrot naprężenie, należy rozumieć w sposób klasyczny, z typową jednostką np. N/m²

Akumulowana prędkość odkształcenia niesprężystego zdefiniowana oryginalnie przez autorów prawa ma postać

$$\dot{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R+D}{J(\boldsymbol{\sigma}')} \right)^{2n} \frac{n+1}{n} \right] \quad (4.4)$$

gdzie wzmocnienie kinematyczne jest opisane funkcją:

$$D = \mathbf{X} : \frac{\boldsymbol{\sigma}}{J(\boldsymbol{\sigma})} \quad (4.5)$$

Natomiast występujący w (4.5) tensor wzmocnienia kinematycznego \mathbf{X} jest zadany równaniem różniczkowym

$$\dot{\mathbf{X}} = m_2 \left(\frac{3}{2} D_1 \frac{\boldsymbol{\sigma}}{J(\boldsymbol{\sigma})} - \mathbf{X} \right) \dot{W}^I - A_2 R_1 \frac{3}{2} \left[\frac{\frac{2}{3} J(\mathbf{X})}{R_1} \right]^{n_2} \frac{\mathbf{X}}{J(\mathbf{X})} \quad (4.6)$$

gdzie:

$$\dot{W}^I = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\mathbf{E}}^I \quad (4.7)$$

Występujące w równaniu (4.4) wzmocnienie izotropowe R (funkcja skalarna) wyznaczono po rozwiązaniu równania różniczkowego

$$\dot{R} = m_1 (R_1 - R) \dot{W}^I - A_1 R_1 \left(\frac{R+R_2}{R_1} \right)^{n_1} \quad (4.8)$$

Stałe A_1 i A_2 w równaniach (4.6) i (4.8) pozwalają uwzględnić procesy regeneracji.

W prawie Bodnera-Partoma nie występuje pojęcie granicy sprężystości, funkcje wzmocnienia izotropowego oraz kinematycznego pojawiają się od początku deformacji. W chwili początkowej wzmocnienie izotropowe występuje w postaci stałej materiałowej

$$t = 0 \Rightarrow R = R_0 \quad (4.9)$$

natomiast wzmocnienie kinematyczne posiada zerowe wartości składowych

$$t = 0 \Rightarrow X_{ij} = 0 \quad (4.10)$$

Prawo Bodnera-Partoma w ogólnym przypadku zawiera dwanaście parametrów materiałowych: $n, n_1, n_2, D_0, D_1, R_0, R_1, R_2, A_1, A_2, m_1, m_2$. Natomiast po odrzuceniu wpływu regeneracji (ostatnie człony w równaniach (4.6) i (4.8)) liczbę parametrów można zredukować do siedmiu: $n, D_0, D_1, R_0, R_1, m_1, m_2$.

4.2. Model Chaboche'a

Model ciała lepkoplastycznego zaproponowany w pracach [14], [38] przez Chaboche'a wywodzi się z modelu Perzyny opisanego w [43]. Model ten w stosunku do modelu Perzyny został uzupełniony o wzbogacony opis wzmocnienia materiałowego. W opisie zaproponowanym przez Chaboche'a tensor prędkości odkształcenia niesprężystego ma postać

$$\dot{\mathbf{E}}^I = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}'}{J(\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}')} \quad (4.11)$$

gdzie akumulowana prędkość odkształcenia niesprężystego opisana jest zależnością

$$\dot{p} \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{2}{3} \dot{\mathbf{E}}^I \cdot \dot{\mathbf{E}}^I \right)^{\frac{1}{2}} = \gamma \left\langle \frac{J(\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}') - R - k}{K} \right\rangle^n, \quad (\gamma = 1.0 [1/s]) \quad (4.12)$$

$\langle \cdot \rangle$ są nawiasami Mc Cauley'a zdefiniowanymi jako

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2} (x + |x|) \quad (4.13)$$

Natomiast tensor wzmocnienia kinematycznego \mathbf{X} w równaniu (4.11) obliczany jest z funkcji prędkości wzmocnienia kinematycznego opisaną zależnością⁴⁾

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{2}{3} a \dot{\mathbf{E}}^I - c f(p) \mathbf{X} \dot{p} \quad (4.14)$$

Wprowadzona w pracy funkcja $f(p)$ akumulowanego odkształcenia (odkształcenie Misesa) ma postać

$$f(p) = l + (1 - l) e^{-\beta p} \quad (4.15)$$

We wcześniejszych wariantach prawa Chaboche'a człon ten nie występuje, dlatego też w dalszych rozważaniach dla uproszczenia został on pominięty.

Wzmocnienie izotropowe (z pominięciem procesów regeneracji) materiału można zapisać w postaci równania różniczkowego

$$\dot{R} = b(R_1 - R) \dot{p} \quad (4.16)$$

Występujące w równaniach (4.12) do (4.16) stałe materiałowe γ , k , K , n , a , c , b , R_1 muszą być wyznaczone w testach laboratoryjnych.

⁴⁾ Przy pominięciu wpływu procesów regeneracji.

Przedstawione w rozdziale 4.1 i 4.2 prawa lepkoplastyczne posiadają postać, jaką można najczęściej spotkać w literaturze. Różnica polega tylko na pominięciu wyrażeń związanych z procesami regeneracji w celu maksymalnego uproszczenia modeli i zredukowania ilości poszukiwanych stałych materiałowych. Należy podkreślić, że celem rozprawy jest nowatorskie podejście do opisu parametrów materiału tekstylnego i zastosowanie do tego opisu równań praw lepkoplastycznych, typowych dla innych materiałów.

4.3. Metodyka wyznaczania parametrów Bodnera-Partoma

Przed przystąpieniem do identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma zapisujemy podstawowe równania tego prawa dla jednoosiowego stanu naprężenia.

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R+D}{\sigma} \right)^{2n} \frac{n+1}{n} \right] \operatorname{sgn}(\sigma);$$

$$\dot{R} = m_1 (R_1 - R) \dot{W}^I, R(0) = R_0;$$

$$\dot{X} = m_2 \left(\sqrt{\frac{3}{2}} D_1 \operatorname{sgn}(\sigma) - X \right) \dot{W}^I;$$

$$\dot{W}^I = \sigma \dot{\epsilon}_p;$$

$$D = \sqrt{\frac{2}{3}} X \operatorname{sgn}(\sigma)$$
(4.17)

W jednoosiowym stanie naprężenia całkujemy jawnie funkcje wzmocnienia:

$$R = R_1 \left[1 - \exp(-m_1 W^I) \right] + R_0 \exp(-m_1 W^I);$$

$$X = \sqrt{\frac{3}{2}} D_1 \operatorname{sgn}(\sigma) \left[1 - \exp(-m_2 W^I) \right];$$

$$D = D_1 \left[1 - \exp(-m_2 W^I) \right]$$
(4.19)

Wprowadzamy funkcjonal wiążący relacje pomiędzy naprężeniem σ , prędkością odkształcenia niesprężystego $\dot{\epsilon}_p$, przy pomocy zmiennych wzmocnienia R i D .

$$\sigma / (R + D) = f_1(\dot{\epsilon}_p)$$
(4.20)

Funkcjonal f_1 w modelu Bodnera-Partoma ma postać:

$$f_1 = \left[\frac{2n}{n+1} \ln \left(\frac{2D_0}{\sqrt{3}\dot{\epsilon}_p} \right) \right]^{-\frac{1}{2n}}$$
(4.21)

W przyjętym w niniejszej rozprawie sposobie identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma kolejność postępowania była następująca:

- wykonano próby jednoosiowe rozciągania przy stałej prędkości odkształcenia, z różnymi wartościami prędkości. Dla danej stałej prędkości odkształcenia przeprowadzono sześć prób na kierunku wątku i dziesięć prób na kierunku osnowy rejestrując czas t , przemieszczenie u oraz siłę F . Niezbędne do dalszej identyfikacji funkcje odkształcenia ε , naprężenia σ i odkształcenia plastycznego ε_p wyznaczono z wzorów

$$\varepsilon = \frac{u}{l}; \quad \sigma = \frac{F}{A}; \quad \varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (4.22)$$

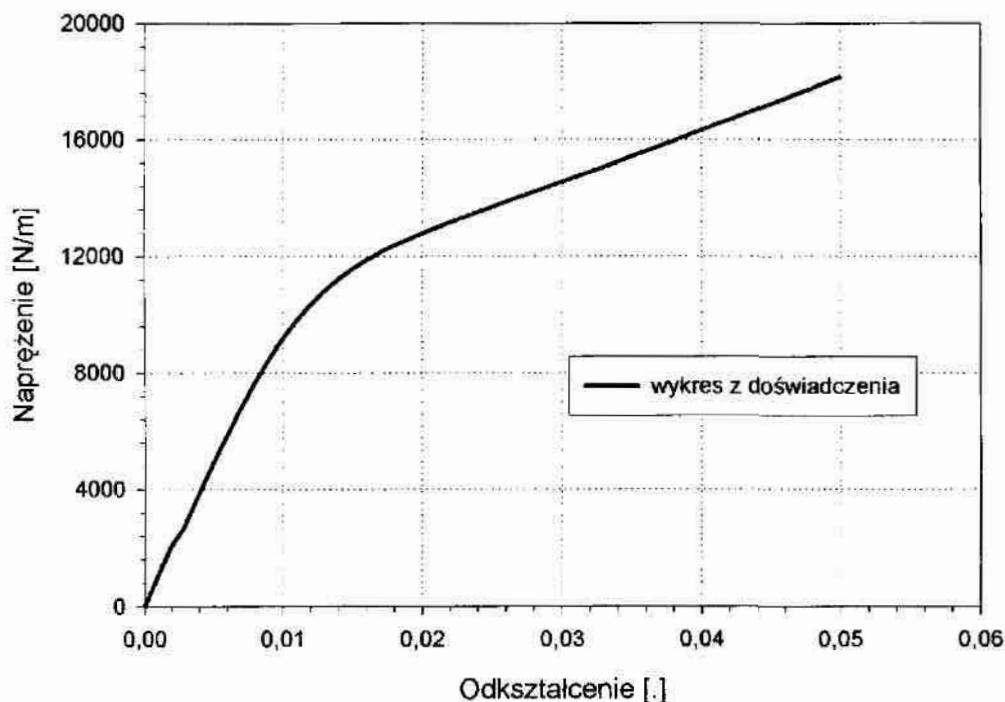
W celu obliczenia prędkości odkształcenia niesprężystego

$$\dot{\varepsilon}_p \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\varepsilon_p}{dt} \quad (4.23)$$

zastosowano następującą regułę różniczkowania numerycznego (reguła trapezów)

$$\dot{\varepsilon}_p(t_i) = \frac{\varepsilon_p(t_i) - \varepsilon_p(t_{i-1})}{dt} + O(dt) \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4.24)$$

gdzie n jest liczbą zarejestrowanych przyrostów.

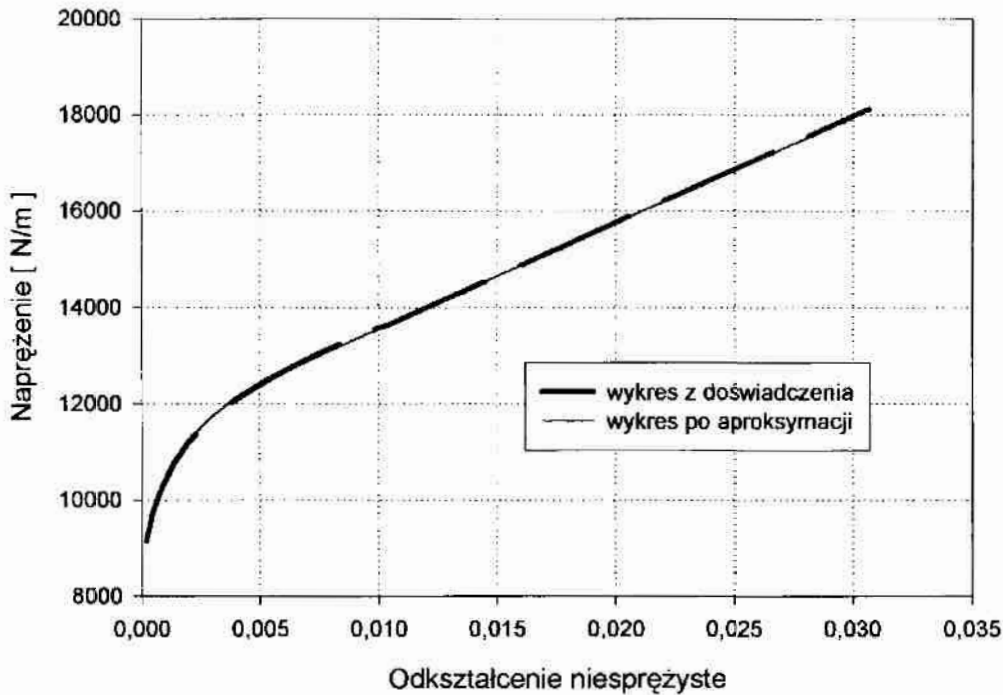


Rys. 4.1. Wyznaczanie parametrów Bodnera-Partoma:
typowy wykres odkształcenie – naprężenie

- wykonano wykres naprężenie – odkształcenie oraz wykres naprężenie – odkształcenie niesprężyste, który aproksymowano w celu wyeliminowania niedokładności doświadczalnych funkcją

$$\sigma = \sigma_0 + a(1 - e^{-b\varepsilon_p}) + c(1 - e^{-d\varepsilon_p}) \quad (4.25)$$

Przykładowe wykresy pokazano na rys. 4.1 i 4.2.



Rys. 4.2. Wyznaczanie parametrów Bodnera-Partoma:
typowy wykres odkształcenie niesprężyste – napężenie

- obliczono pochodną funkcji naprężenia względem odkształcenia niesprężystego

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} = a_1 b_1 e^{-b_1 \varepsilon_p} + c_1 d_1 e^{-d_1 \varepsilon_p} \quad (4.26)$$

gdzie: a_1 , b_1 , c_1 , d_1 , są współczynnikami wyznaczanymi w aproksymacji średnio-kwadratowej,

- pochodna ta umożliwiła znalezienie funkcji prędkości pracy wzmocnienia $\bar{\gamma}$

$$\bar{\gamma} = \frac{d\sigma}{dW_p} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_p} \cdot \frac{1}{\sigma}, \text{ bo } dW_p = \sigma \cdot d\varepsilon_p \quad (4.27)$$

a wykorzystując wzory (4.18) i (4.20) można zapisać

$$\bar{\gamma} = f_1 [m_1 (R_1 - R) + m_2 (D_1 - D)] \quad (4.28)$$

- wykonano wykres napężenie – funkcja $\bar{\gamma}$ (rys. 4.3) w celu znalezienia parametrów m_1 i m_2 . Parametr m_2 identyfikujemy dla bardzo małych odkształceń niesprężystych ($\varepsilon_p \approx 0.2\%$) na podstawie zależności (4.20), która przyjmuje postać

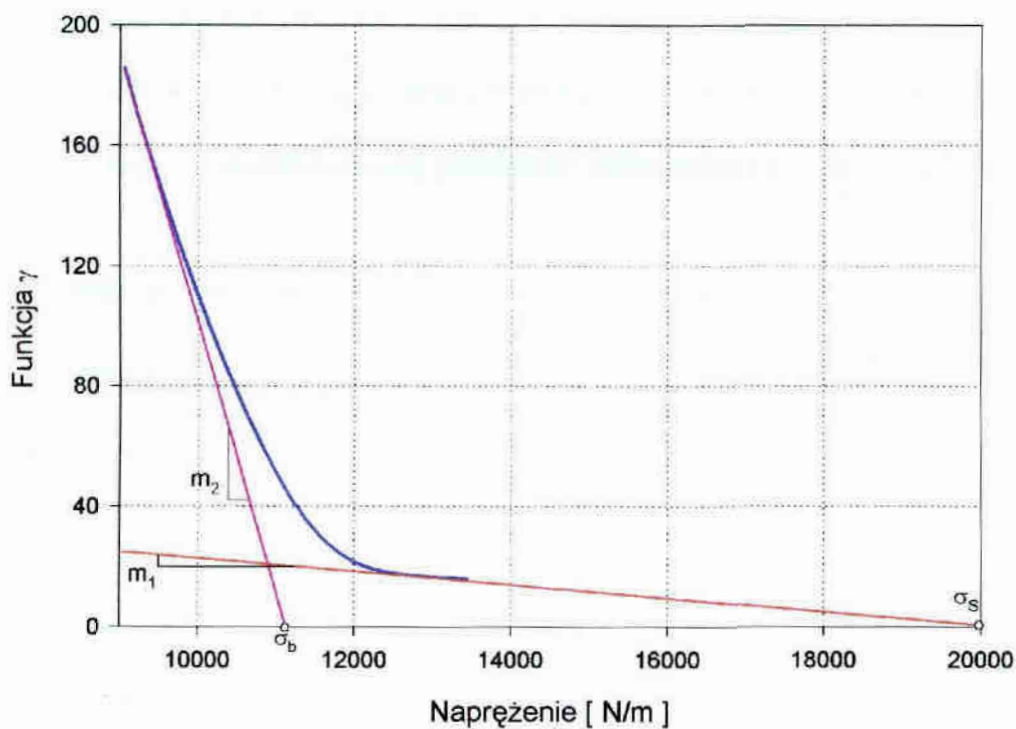
$$D = \sigma / f_1(\dot{\varepsilon}_{p02}) - R \approx \sigma / f_1(\dot{\varepsilon}_{p02}) - R_0 \quad (4.29)$$

z równania (4.28) mamy

$$\bar{\gamma} = f_1(\dot{\varepsilon}_{p02})[m_1(R_1 - R_0) + m_2(R_0 - D_1)] - m_2\sigma \quad (4.30)$$

Natomiast parametr m_1 określamy w górnym zakresie małych odkształceń ($\varepsilon_p \approx 1.5\%$), gdy funkcje wzmocnienia osiągają wartości maksymalne (saturacja wzmocnienia). Ze względu na fakt, że wzmocnienie kinematyczne osiąga graniczną wartość szybciej niż wzmocnienie izotropowe (patrz [49]), to $m_2 > m_1$, i wzór (4.28) przyjmuje postać

$$\bar{\gamma} = f_1(\dot{\varepsilon}_{p2})m_1(R_1 + D_1) - m_1\sigma \quad (4.31)$$

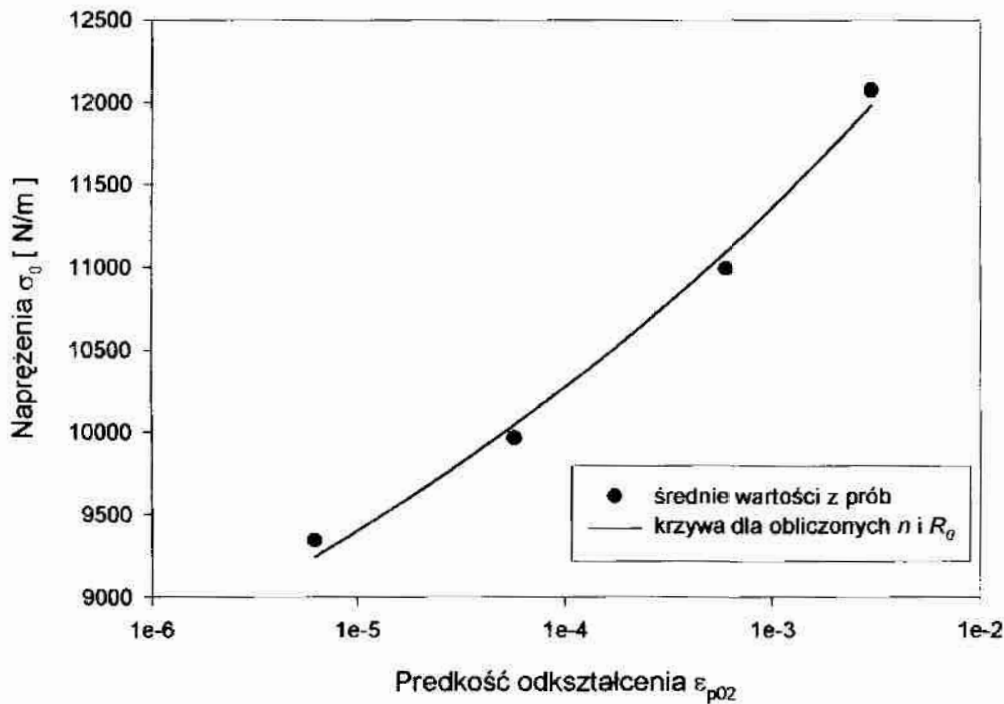


Rys. 4.3. Wyznaczanie parametrów Bodnera-Partoma: m_1 i m_2

- stałą D_0 , która oznacza maksymalną prędkość odkształcenia mogącą wystąpić w materiale, przyjmuje się w sposób arbitralny, mając na uwadze dane z literatury np. prace [10], [27] gdzie za D_0 przyjmowano 10^4 s^{-1} dla prędkości odkształcenia 10 s^{-1} , a przy wyższych prędkościach 10^1 do 10^3 s^{-1} $D_0 = 10^6 \text{ s}^{-1}$, a nawet $D_0 = 10^8 \text{ s}^{-1}$ w zagadnieniach dynamicznych. Postanowiono ze względu na małe prędkości odkształcenia występujące w badanym materiale (quasi-statyka) przyjąć $D_0 = 1 \text{ s}^{-1}$,
- kolejne parametry n i R_0 (rys.4.4) określamy ze wzoru

$$\sigma_{02} = \left[\frac{2n}{n+1} \ln \left(\frac{2D_0}{\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_{p02}} \right) \right]^{-\frac{1}{2n}} R_0 \quad (4.32)$$

otrzymanego przy wykorzystaniu wzorów (4.20) i (4.21) dla małych wartości odkształceń ($\varepsilon = 0.2\%$). Dla tak małych odkształceń niesprężystych wpływ wzmocnienia jest równy jego wartości początkowej $R = R_0$, a wzmocnienie kinematyczne jeszcze nie występuje i można je pominąć. Wzór (4.32) może być traktowany w prawie Bodnera-Partoma jako definicja technicznej granicy sprężystości (przy przyjęciu $\dot{\varepsilon}_{02} \approx \dot{\varepsilon}_{p02}$). Metodą najmniejszych kwadratów wyliczamy wartości n i R_0 , znajdując wcześniej średnie wartości σ_{02} dla każdej z grup prób o przyjętej w badaniach stałej prędkości odkształcenia 10^{-4} , 10^{-3} , $5 \cdot 10^{-3}$, $1.67 \cdot 10^{-3}$ 1/s. Natomiast za prędkość odkształcenia niesprężystego $\dot{\varepsilon}_{p02}$ przyjmujemy wartość średnią z powyższych prób odczytując wartość ustabilizowanej prędkości odkształcenia – przykład na rys. 5.3.



Rys. 4.4. Wyznaczanie parametrów Bodnera-Partoma: n i R_0

- parametry D_1 i R_1 obliczamy z układu równań:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{m_2 \sigma_b}{f_1(\dot{\varepsilon}_{p02})(m_2 - m_1)} - \frac{m_1 \sigma_s}{f_1(\dot{\varepsilon}_{p2})(m_2 - m_1)} - R_0, \\ R_1 &= \frac{m_2 \sigma_s}{f_1(\dot{\varepsilon}_{p2})(m_2 - m_1)} - \frac{m_2 \sigma_b}{f_1(\dot{\varepsilon}_{p02})(m_2 - m_1)} + R_0 \end{aligned} \quad (4.33)$$

otrzymanego z równań (4.30) i (4.31) dla $\bar{\gamma} = 0$,

gdzie σ_b i σ_s są punktami przecięcia stycznych z osią naprężeń przedstawionych na rys. 4.3.

Ten algorytm identyfikacji jest opisany w [58].

4.4. Metodyka wyznaczania parametrów Chaboche'a

Podobnie jak w modelu Bodnera-Partoma, przed przystąpieniem do identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a zapisujemy podstawowe równania tego prawa dla jednoosiowego przypadku obciążenia. Dewiatory tensora naprężenia i funkcji wzmocnienia kinematycznego mają postać

$$\boldsymbol{\sigma}' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}X & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}X & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}X \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

gdzie: σ jest naprężeniem w kierunku działania obciążenia,

X wartością funkcji wzmocnienia kinematycznego w tym kierunku.

Zatem inwariant J różnicy tych funkcji otrzymuje uproszczoną postać

$$J(\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}') = |\sigma - X| \quad (4.35)$$

Podane w rozdziale 4.2 podstawowe równania prawa Chaboche'a można zapisać w postaci

$$\begin{aligned} \dot{p} &= |\dot{\varepsilon}_p| = \gamma \left\langle \frac{|\sigma - X| - R - k}{K} \right\rangle^n; \\ \dot{\varepsilon}_p &= \gamma \left\langle \frac{|\sigma - X| - R - k}{K} \right\rangle^n \operatorname{sgn}(\sigma - X); \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{2}{3} a \dot{\varepsilon}_p - c X |\dot{\varepsilon}_p|; \\ \dot{R} &= b (R_1 - R) |\dot{\varepsilon}_p| \end{aligned} \quad (4.37)$$

Całkując jawnie obie funkcje wzmocnienia otrzymujemy

$$X = \nu \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{c} + \left(X_0 - \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{c} \right) \exp(-c(\varepsilon_p - \varepsilon_{p0})) ; \quad (4.38)$$

$$R = R_1 \left(1 - \exp(-b|\varepsilon_p|) \right)$$

gdzie: $\nu = \text{sgn}(\sigma - X) = \pm 1$,

X_0 początkowa wartość funkcji wzmocnienia kinematycznego,

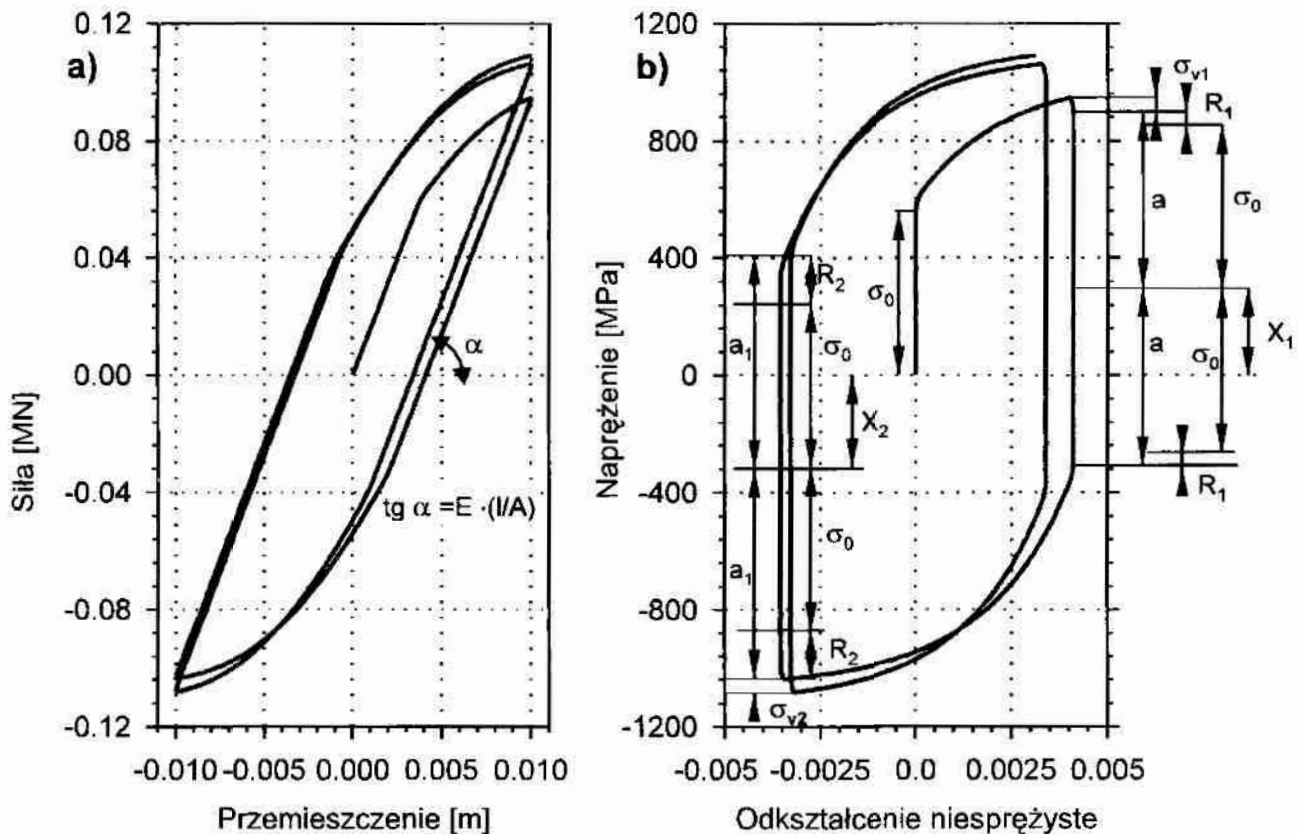
ε_{p0} początkowa wartość funkcji odkształcenia niesprężystego.

Wykorzystując równania (4.37) można wyznaczyć funkcję określającą naprężenie

$$\sigma = X(\varepsilon_p, X_0, \varepsilon_{p0}) + \nu R(|\varepsilon_p|) + \nu k + \nu K |\dot{\varepsilon}_p|^n \quad (4.39)$$

4.4.1. Metodyka identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a na podstawie znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma

Wykonanie badań w postaci pełnych cykli obciążenia, do uzyskania takiej samej wartości odkształcenia przy rozciąganiu i ściskaniu, ponad wartość odkształcenia powodującego uplastycznienie, jest najbardziej efektywną metodą doświadczalną do identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a [38].



Rys. 4.5. Wyznaczanie parametrów Chaboche'a – obciążenie cykliczne

Przykłady takiej identyfikacji można znaleźć w pracach [4] i [38]. Typowe wykresy przemieszczenie – siła i odkształcenie niesprężyste – naprężenie uzyskane w takiej próbie przedstawiono na rys. 4.5. Wykres a), otrzymujemy bezpośrednio z doświadczenia, natomiast wykres b), budujemy wykorzystując zależności (4.22) dla wszystkich punktów uzyskanych z pomiaru. Parametry na rys.4.5 b) oznaczają:

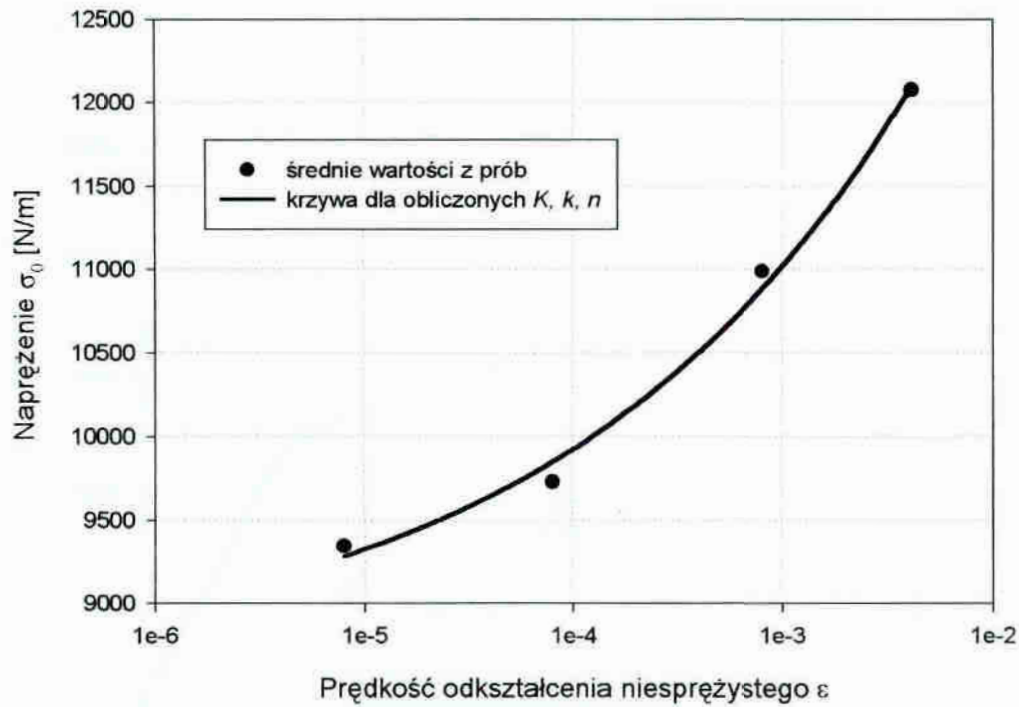
- σ_0 - początkową granicę sprężystości,
- a - połowę zmiany naprężenia bez zmiany odkształcenia niesprężystego w trakcie odciążania,
- R_1 - wzmocnienie izotropowe, $R_1 = a - \sigma_0$,
- X_1 - wzmocnienie kinematyczne,
- σ_{v1} - naprężenie związane ze zjawiskami lepkimi.

Ze względu na niemożność przeprowadzenia takich badań na materiale tekstylnym, postanowiono wykorzystać numeryczną symulację testów obciążeń cyklicznych ze stałą prędkością odkształcenia na podstawie znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano program komputerowy opisany w rozdziale 6. Przyjęto następującą kolejność postępowania:

- przeprowadzono wiele prób symulacji cyklicznych obciążeń wahadłowych ze stałą prędkością odkształcenia dla różnych zakresów odkształceń $\Delta\varepsilon$. Zaobserwowano, że stabilizacja wzmocnienia występuje dopiero po 500 do 2000 cyklach obciążenia,
- odczytano maksymalne wartości naprężeń σ_{stab} , odkształcenia niesprężystego ε^I_{stab} i prędkości odkształcenia niesprężystego $\dot{\varepsilon}^I_{stab}$ dla ustabilizowanej histerezy,
- dysponując próbami dla różnych prędkości odkształcenia, wykonano wykres naprężenia σ_0 w funkcji prędkości odkształcenia niesprężystego przedstawiony na rys.4.6 (zobacz też rys. 4.4),
- metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono wartości parametrów: K , k oraz n tak, aby funkcja

$$\sigma_0 = K \left(\dot{\varepsilon} \cdot \text{sgn}(\sigma) \right)^{\frac{1}{n}} + k \quad (4.40)$$

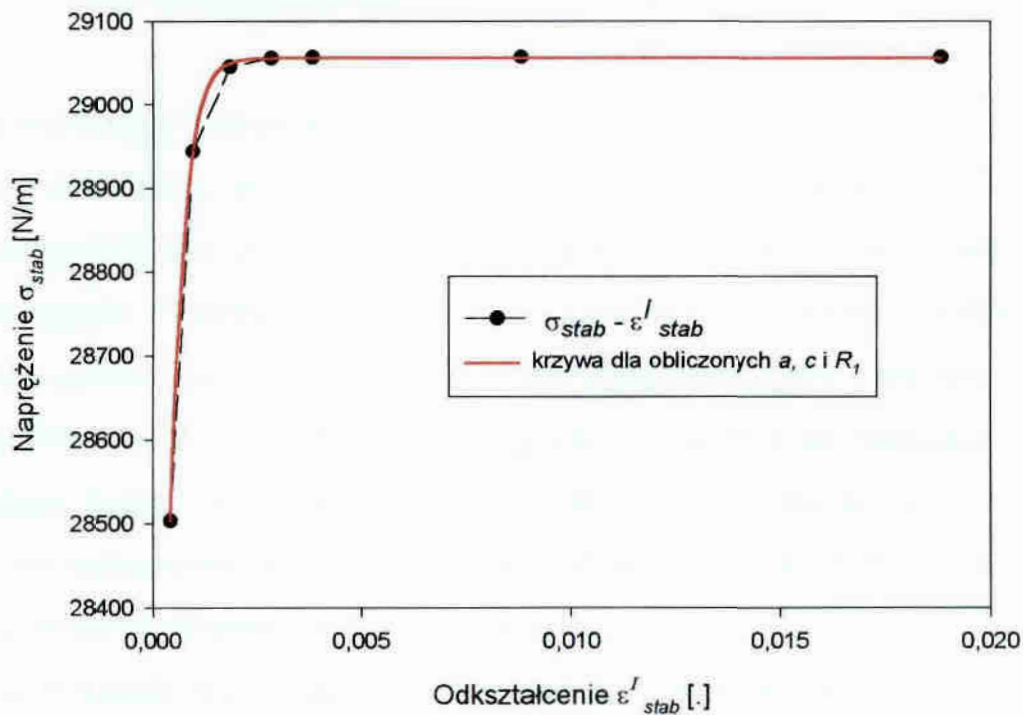
dobrze aproksymowała wartości z badań (patrz rys. 4.6).



Rys. 4.6. Wyznaczanie parametrów Chaboche'a: K , k i n

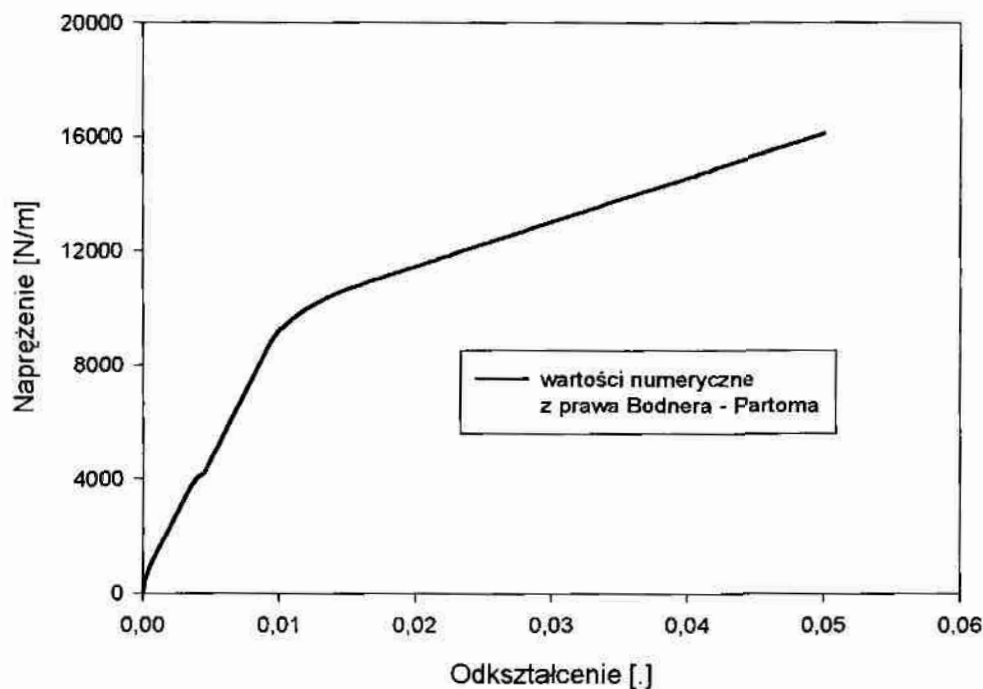
- parametry a , c i R_1 wyznaczono z wzoru na maksymalną wartość naprężeń w teście obciążeń cyklicznych wahadłowych – według publikacji [2], (rys. 4.7)

$$\sigma_{stab} = \frac{a}{c} \tanh(c \epsilon_{stab}^J) + R_1 + k + K (\dot{\epsilon}_{stab}^J)^{\frac{1}{n}} \quad (4.41)$$



Rys. 4.7. Wyznaczanie parametrów Chaboche'a: a , c i R_1

- wyznaczono wykres naprężenie – odkształcenie na podstawie parametrów znanych dla prawa Bodnera-Partoma – rys. 4.8,



Rys. 4.8. Wyznaczanie parametrów Chaboche'a: b

- parametr b wyznaczono na podstawie rys. 4.8, przy wykorzystaniu zależności (4.38) i (4.39), posługując się metodą najmniejszych kwadratów.

4.4.2. Metodyka identyfikacji bezpośredniej na podstawie badań

Identyfikacja bezpośrednia na podstawie przeprowadzonych badań rozciągania próbek jest trudniejsza, ze względu na konieczność podania parametrów początkowych do identyfikacji funkcji dla znacznej liczby parametrów jednocześnie i niejednoznaczność rozwiązania. Zaobserwowano, że wynik końcowy identyfikacji bardzo zależy od parametrów początkowych. W tej sytuacji zazwyczaj wykorzystuje się dane dla zbliżonych materiałów z literatury. Jednak ze względu na nietypowość materiału w tym wypadku takich danych w publikacjach brak. Dlatego też postanowiono jako parametry początkowe wykorzystać wartości uzyskane z identyfikacji parametrów Chaboche'a na podstawie znanych parametrów Bodnera-Partoma.

Na początek identyfikuje się parametr k - granicę sprężystości dla zerowej prędkości odkształcenia. Wykorzystano podobnie jak w rozdziale 4.4.1 wartości σ_0 wyznaczone z poszczególnych prób laboratoryjnych. Metodą najmniejszych kwadratów

znaleziono granicę sprężystości w funkcji prędkości odkształcenia, wykorzystując równanie (4.40) dobrze aproksymujące charakter poszukiwanej funkcji i ekstrapolowano ją do $\dot{\varepsilon} = 0$.

Kiedy korzysta się jedynie z wyników prób rozciągania, nie jest możliwe rozdzielanie efektów lepkich i funkcji wzmocnień we wzorze (4.39). A zatem wszystkie pozostałe parametry prawa Chaboche'a muszą być identyfikowane jednocześnie. Ponieważ dla tego przypadku $\varepsilon_{p0} = 0$ i $X_0 = 0$, to wyrażenia (4.38) określające funkcje wzmocnienia przyjmują postać

$$\begin{aligned} X &= \frac{2}{3} \frac{a}{c} (1 - \exp(-c\varepsilon_p)); \\ R &= R_1 (1 - \exp(-b\varepsilon_p)). \end{aligned} \tag{4.42}$$

5. Identyfikacja parametrów

5.1. Przygotowanie wyników doświadczalnych do identyfikacji

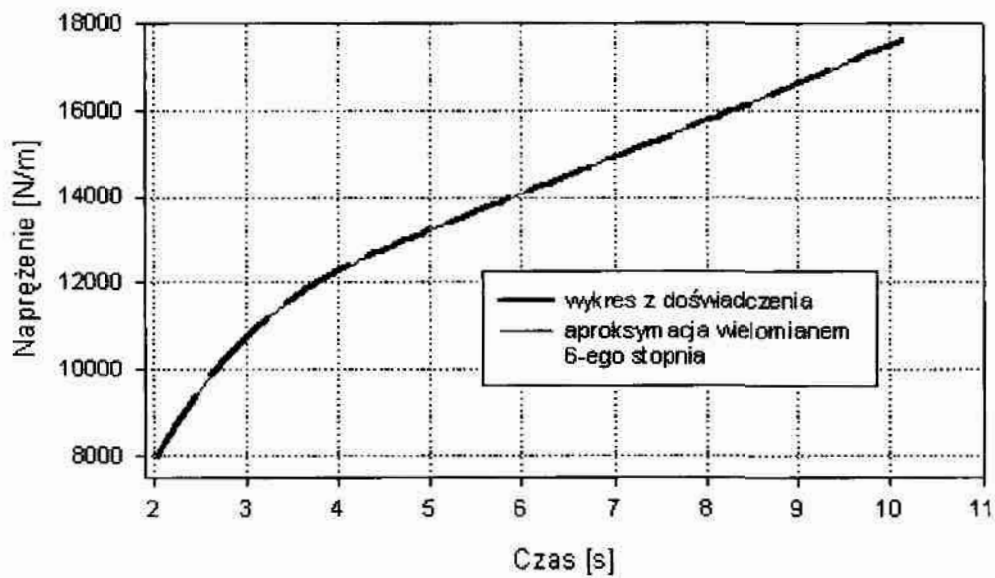
Wyniki eksperymentalne opisane w rozdziale 2, które wykorzystane zostaną do identyfikacji, poddane były procesowi obróbki wstępnej. Polegała ona na:

- modyfikacji (przesunięciu) otrzymanych z doświadczenia odkształceń tak, aby zerowej wartości naprężenia odpowiadała zerowa wartość odkształcenia – w celu wyeliminowania zarejestrowanego wstępnego napięcia materiału,
- wygładzeniu funkcji naprężenia i odkształceń niesprężystych w czasie poprzez aproksymację wielomianem, metodą najmniejszych kwadratów. Aproksymacji poddano wartości powyżej granicy proporcjonalności, gdyż do tej granicy wykres ma charakter liniowy.

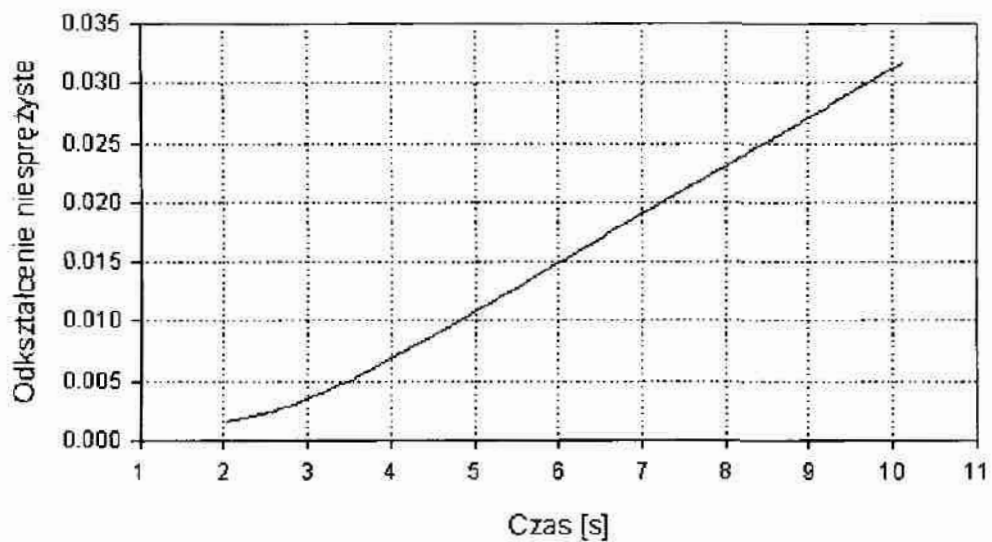
Ponieważ próby wykonywane były ze stałą prędkością odkształcenia, czyli rejestracja odbywała się w stałych odstępach czasowych, wykresy poddawane aproksymacji (wygładzaniu) sporządzano w funkcji czasu. Powyższy proces wykonano powyżej granicy sprężystości. Analizowany zakres odkształceń (i naprężeń) podzielono na dwie części: zaraz po przekroczeniu granicy sprężystości zastosowano wielomian szóstego stopnia, a następnie, gdy wykres ponownie staje się zbliżony do liniowego, wielomian pierwszego stopnia. Ze względu na jednakowy sposób przygotowania wszystkich zarejestrowanych prób do identyfikacji, ograniczono się tylko do podania przykładowej aproksymacji dla wybranej próby na kierunku osnowy. Omówioną aproksymację naprężeń względem czasu ilustruje rys. 5.1, gdzie otrzymano następującą funkcję

$$\begin{aligned}\sigma = f_1(t) &= -0.9t^6 + 9.64t^5 - 2.55t^4 - 213.97t^3 - 145.33t^2 + \\ &\quad + 6425.4t - 2943.0 \text{ dla } t < 5s; \\ \sigma = f_2(t) &= 853.3t + 8949.7 \text{ dla } t > 5s\end{aligned}\tag{5.1}$$

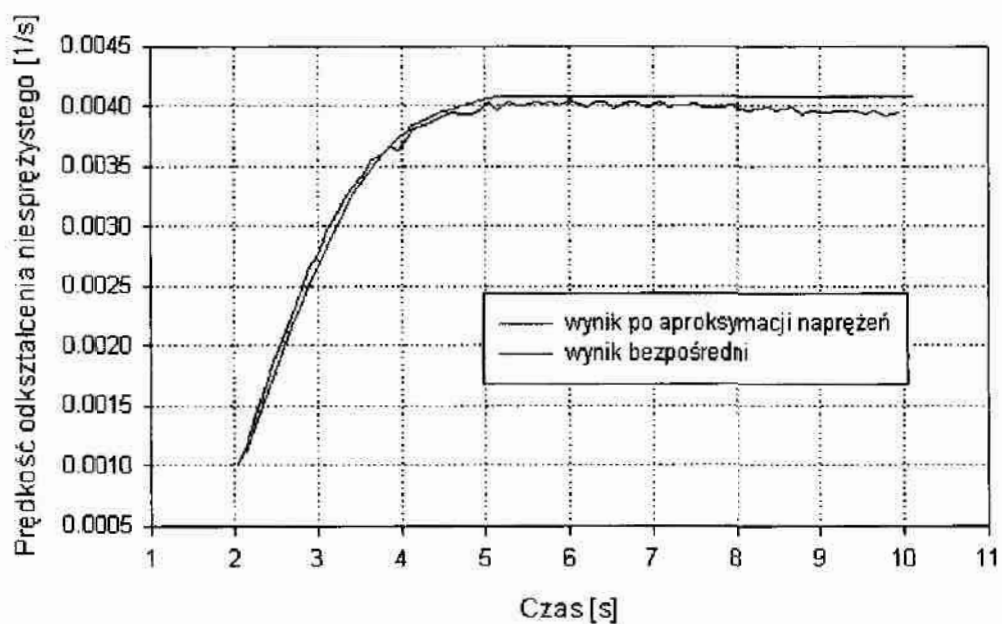
W celu obliczenia odkształcenia niesprężystego wykorzystano zależności (4.22) oraz wyznaczony w rozdziale 2.2 moduł Younga E . Na rys. 5.2 pokazano wykres funkcji odkształcenia niesprężystego w czasie. Na podstawie aproksymowanych wartości naprężeń wyznaczono również wykres prędkości odkształcenia niesprężystego w funkcji czasu (rys. 5.3) i porównano go z wynikiem otrzymanym bezpośrednio z pomiaru tożnaczą z naprężeń nie aproksymowanych.



Rys. 5.1. Aproksymacja naprężeń w funkcji czasu



Rys. 5.2. Wykres odkształcenia niesprężystego w funkcji czasu



Rys. 5.3. Wykres prędkości odkształcenia niesprężystego w funkcji czasu

Jak wynika z analizy rys. 5.3 funkcja prędkości odkształcenia niesprężystego otrzymana bezpośrednio z doświadczenia ze względu na brak gładkości nie mogła zostać wykorzystana do dalszej identyfikacji parametrów praw konstytutywnych. Aproxymowany wykres prędkości odkształcenia otrzymano poprzez różniczkowanie numeryczne zgodnie z równaniem (4.24).

Przedstawiony wyżej sposób przygotowania wyników do identyfikacji parametrów praw konstytutywnych zastosowano we wszystkich próbach doświadczalnych.

5.2. Identyfikacja parametrów modelu Bodnera-Partoma

Identyfikacji poddano wszystkie pojedyncze próby doświadczalne na kierunku osnowy przygotowane wstępnie według sposobu podanego w rozdziale 5.1.

Metodę identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma opisano w rozdziale 4.3. Wyniki identyfikacji dla pojedynczych prób ilustruje tabela 5.1. Jako wynik identyfikacji parametrów Bodnera-Partoma przyjęto średnią z wyników przedstawionych w tabeli 5.1.

Tabela 5.1

Identyfikacja parametrów modelu Bodnera-Partoma dla kierunku osnowa

Parametr	Jednostka	Numer próby				
		A_os14i	A_os15i	A_os16i	A_os32i	A_os34i
σ_{02}	N/m	9343.0	9343.0	9343.0	9343.0	9343.0
ε_{02}	s ⁻¹	0.000008	0.000008	0.000008	0.000008	0.000008
m_2	[N/m] ⁻¹	0.1214	0.1056	0.1182	0.0631	0.1401
m_1	[N/m] ⁻¹	0.001490	0.001494	0.001347	0.001630	0.001486
σ_b	N/m	9846.7	9635.6	10181.1	9936.0	9835.4
σ_s	N/m	25580.4	25034.7	25950.5	26275.4	26035.4
n	-	2.661				
R_0	N/m	15960.0				
D_1	N/m	524.2	120.0	1119.0	270.0	542.2
R_1	N/m	43166.9	42639.1	43204.3	44608.1	43926.1

Tabela 5.1 cd.

Parametr	Jednostka	Numer próby				
		B_os10i	B_os13i	B_os20i	B_os21i	B_os22i
σ_{02}	N/m	9729.4	9729.0	9729.0	9729.0	9729.0
ε_{02}	s ⁻¹	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008	0.00008
m_2	[N/m] ⁻¹	0.0919	0.0850	0.0872	0.0949	0.0937
m_1	[N/m] ⁻¹	0.001937	0.001300	0.001743	0.001849	0.001409
σ_b	N/m	10602.0	10929.5	10436.5	10449.0	10413.0
σ_s	N/m	21307.7	25530.1	22392.2	21712.4	23944.5
n	-	2.661				
R_0	N/m	15960.0				
D_1	N/m	1051.5	1594.7	758.3	811.9	780.9
R_1	N/m	33898.0	40280.4	35969.9	34801.4	38493.5

Tabela 5.1 cd.

Parametr	Jednostka	Numer próby				
		B_os23i	B_os24i	C_os11i	C_os12i	C_os17i
σ_{02}	N/m	9729.0	9729.0	10991.0	10991.0	10991.0
ε_{02}	s ⁻¹	0.00008	0.00008	0.0008	0.0008	0.0008
m_2	[N/m] ⁻¹	0.0932	0.0935	0.0866	0.0847	0.0645
m_1	[N/m] ⁻¹	0.001674	0.001134	0.001279	0.001196	0.001799
σ_b	N/m	10653.7	10865.3	11197.1	11577.3	10979.5
σ_s	N/m	22156.8	27432.6	25710.4	27160.3	19628.5
n	-	2.661				
R_0	N/m	15960.0				
D_1	N/m	1169.5	1528.0	1142.5	1725.3	755.5
R_1	N/m	35172.8	43467.7	38904.7	40580.4	29818.4

Tabela 5.1 cd.

Parametr	Jednostka	Numer próby				
		C_os18i	C_os19i	C_os25i	C_os26i	C_os27i
σ_{02}	N/m	10991.0	10991.0	10991.0	10991.0	10991.0
ε_{02}	s ⁻¹	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
m_2	[N/m] ⁻¹	0.0891	0.1190	0.1029	0.0968	0.0936
m_1	[N/m] ⁻¹	0.001186	0.001637	0.001192	0.001204	0.001226
σ_b	N/m	11382.3	11397.1	11123.4	11234.9	11190.7
σ_s	N/m	26829.9	23324.9	26769.3	26812.2	26714.7
n	-	2.661				
R_0	N/m	15960.0				
D_1	N/m	1445.0	1533.4	1080.4	1234.2	1150.0
R_1	N/m	40345.9	34798.2	40616.3	40529.4	40461.5

Tabela 5.1 cd.

Parametr	Jednostka	Numer próby				
		D28os_BP	D29os_BP	D30os_BP	D37os_BP	D38os_BP
σ_{02}	N/m	12075.0	12075.0	12075.0	12075.0	12075.0
ε_{02}	s ⁻¹	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
m_2	[N/m] ⁻¹	0.0533	0.0550	0.0561	0.0704	0.0695
m_1	[N/m] ⁻¹	0.001281	0.001245	0.001322	0.001193	0.001185
σ_b	N/m	13214.6	12771.9	12642.8	11687.4	11269.2
σ_s	N/m	26744.0	26656.3	25811.8	26680.0	26901.1
n	-	2.661				
R_0	N/m	15960.0				
D_1	N/m	3168.1	2527.4	2342.0	1011.2	371.6
R_1	N/m	36544.6	37055.0	35986.5	38606.5	39574.4

Wartości średnie parametrów modelu Bodnera-Partoma podano w tabeli 5.2.

Tabela 5.2

Parametr	Jednostka	Wartość
m_1	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.001417
m_2	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.0892
D_0	N/m	1.0
D_1	N/m	1190.3
n	-	2.661
R_0	N/m	15960.0
R_1	N/m	38938.0

5.3. Analiza wyników identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma

Prowadząc w rozdziale 5.2 identyfikację parametrów prawa Bodnera-Partoma uzyskano wartości tych parametrów dla poszczególnych prób doświadczalnych. W niniejszym rozdziale podjęto próbę analizy błędu obliczeniowego. Problem odrzucania wyników otrzymanych na podstawie konkretnych prób doświadczalnych jest zagadnieniem kontrowersyjnym i wśród ekspertów nie ma jednomyślności na ten temat. W pozycjach [42], [56] przedstawionych jest wiele metod i kryteriów odrzucania danych pomiarowych, jednak dotyczą one pomiarów i obliczeń wartości jednej miary. W niniejszej rozprawie zdecydowano się na ustalenie kryterium odrzucania wyników pomiarów prezentowanego między innymi w pozycji [54]. Ze względu na różne miary identyfikowanych parametrów postanowiono posłużyć się współczynnikiem zmienności będącym względną miarą zróżnicowania. Współczynnik zmienności V_s jest ilorazem odchylenia standardowego s oraz odpowiednich wartości średnich \bar{x} i jest wyrażony w procentach.

$$V_s = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Występujące w (5.2) odchylenie standardowe s wyrażone jest wzorem

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.3)$$

gdzie: n – oznacza liczebność próby,

x_i - poszczególny wynik,

\bar{x} - wartość średnia.

Jest ono charakterystyką często wykorzystywaną w badaniach statystycznych i posiada następujące właściwości:

- jest wielkością obliczoną na podstawie wszystkich obserwacji w danym szeregu,
- jego wartość nie zmienia się, jeżeli liczebność wyrazimy w procentach,
- wartość jego nie ulegnie zmianie, gdy do wszystkich elementów szeregu dodamy pewną stałą liczbę,
- jeżeli wszystkie wartości danego szeregu pomnożymy przez pewną stałą liczbę większą od zera, to odchylenie standardowe będzie tylkrotnie większe.

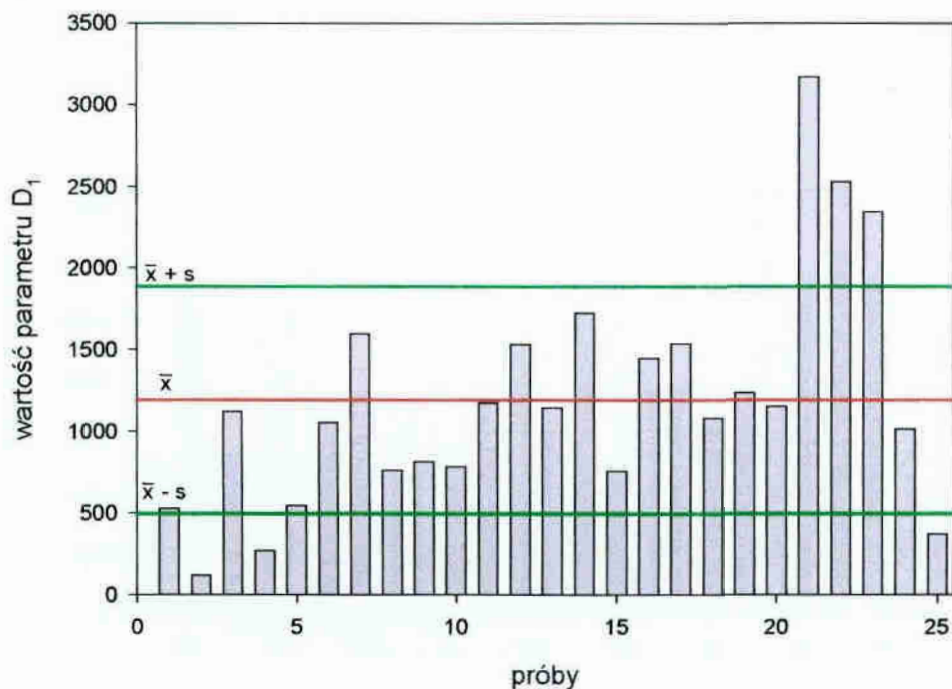
W tabeli 5.3 zestawiono wartości średnie parametrów prawa Bodnera-Partoma prezentowane w tabeli 5.2 wraz z odchyleniami standardowymi i współczynnikami zmienności. Jako kryterium odrzucenia obliczonej wartości (parametru), a w konsekwencji próby, na podstawie której została obliczona, przyjęto wartość współczynnika zmienności równą 40%.

Tabela 5.3

Parametr	Jednostka	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności V_s
m_1	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.001417	0.000237	17 %
m_2	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.0892	0.0220	24 %
D_0	N/m	1.0	_*	_*
D_1	N/m	1190.3	694.6	58 %
n	-	2.661	_*	_*
R_0	N/m	15960.0	_*	_*
R_1	N/m	38938.0	3611.2	9 %

* parametry identyfikowane jednocześnie dla wszystkich prób zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 4.3, rys. 4.4

Zaobserwowano, iż współczynnik zmienności jedynie dla wartości parametru D_1 wynosi 58% i jest większy od przyjętego kryterium. Zdecydowano się więc na odrzucenie z procesu identyfikacji prób wykraczających poza zakres $\bar{x} \pm s$ dla rozpatrywanego parametru D_1 , co graficznie przedstawia rys.5.4. Następnie przeprowadzono identyfikację parametrów bez odrzuconych sześciu prób.



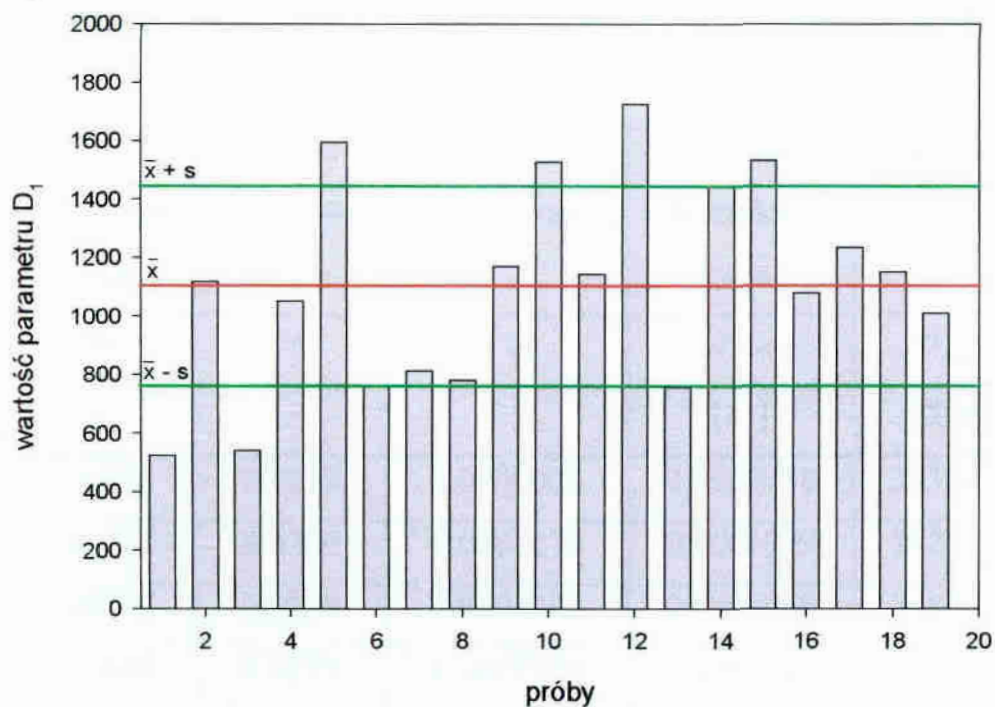
Rys. 5.4. Analiza statystyczna parametru D_1

Ostatecznie przyjęte wartości jako wynik końcowy identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma zestawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4

Parametr	Jednostka	Wartość średnia \bar{x}	Odchylenie standardowe s	Współczynnik zmienności V_s
m_1	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.001436	0.000254	17 %
m_2	$[\text{N/m}]^{-1}$	0.0961	0.0175	18 %
D_0	N/m	1.0	_*	_*
D_1	N/m	1103.0	342.3	31 %
n	-	2.661	_*	_*
R_0	N/m	15960.0	_*	_*
R_1	N/m	38791.7	3708.8	9 %

* parametry identyfikowane jednocześnie dla wszystkich prób zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 4.3, rys. 4.4



Rys. 5.5. Analiza statystyczna parametru D_1

Jak wynika z analizy rysunku 5.5 i tabeli 5.4, po ponownej identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma znacznie zmalały: odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. Należy zwrócić uwagę na fakt, że część prób po nowej identyfikacji nadal wykracza poza zakres $\bar{x} \pm s$. Ze względu jednak na fakt, iż współczynnik zmienności osiągnął wartość poniżej przyjętego kryterium 40% dla wszystkich identyfikowanych parametrów, postanowiono nie wykluczać większej ilości prób z identyfikacji.

5.4. Identyfikacja parametrów modelu Chaboche'a

5.4.1. Identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a na podstawie znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma

Do identyfikacji wykorzystano numeryczną symulację testów obciążeń cyklicznych ze stałą prędkością odkształcenia na podstawie znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma. Przeprowadzono trzynaście prób symulacji cyklicznych obciążeń wahałowych ze stałą prędkością odkształcenia $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}$ 1/s dla różnych zakresów odkształceń $\Delta\varepsilon$. Otrzymane maksymalne wartości naprężeń σ_{stab} , odkształcenia niesprężystego

ε^I_{stab} i prędkości odkształcenia niesprężystego $\dot{\varepsilon}^I_{stab}$ dla ustabilizowanej histerezy ilustruje tabela 5.5.

Tabela 5.5

Liczba kroków	Przyrost przemieszczeń	Zakres odkształceń	Odkształcenie plastyczne	Prędkość odkształcenia plastycznego	Napężenie	Ilość cykli
Ln	Δu	$\Delta \varepsilon$	ε^I_{stab}	$\dot{\varepsilon}^I_{stab}$	σ_{stab}	-
-	-	[.]	[.]	[s ⁻¹]	[N/m]	-
2500	0.00001	0.0250	0.0000005	0.0000298	23304.6	2000
2600	0.00001	0.0260	0.0000273	0.0001859	24211.7	2000
2700	0.00001	0.0270	0.0002083	0.0004026	24975.2	1000
2750	0.00001	0.0275	0.0003535	0.0005221	25306.0	1000
2800	0.00001	0.0280	0.0005530	0.0006767	25586.1	1000
2900	0.00001	0.0290	0.0012493	0.0009405	25869.2	500
3000	0.00001	0.0300	0.0022054	0.0009521	25910.2	500
3100	0.00001	0.0310	0.0032020	0.0009997	25913.3	500
3200	0.00001	0.0320	0.0042018	0.0009999	25913.5	100
3300	0.00001	0.0330	0.0052018	0.0009999	25913.5	100
3500	0.00001	0.0350	0.0072018	0.0010000	25913.5	100
4000	0.00001	0.0400	0.0122018	0.0010000	25913.5	100
5000	0.00001	0.0500	0.0222018	0.0010000	25913.5	100

Tabela 5.6

Stała	Jednostka	Wartość parametru
k	N/m	8592.8
K	N/m	14683.9
n	-	3.84
a	N/m	136187940.2
c	-	9602.4
b	-	4.02
R_1	N/m	16610.2
γ	s ⁻¹	1.0

Identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a dokonano zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 4.4.1, wykorzystując przygotowane wcześniej według sposobu podanego w rozdziale 5.1 wyniki prób doświadczalnych. Rezultaty identyfikacji stałych materiałowych na podstawie numerycznej symulacji testów obciążeń cyklicznych ze stałą prędkością odkształcenia z wykorzystaniem znanych parametrów prawa Bodnera-Partoma zamieszczono w tabeli 5.6.

5.4.2. Identyfikacja bezpośrednia parametrów modelu Chaboche'a na podstawie badań

Identyfikacji bezpośredniej parametrów Chaboche'a dokonano zgodnie z metodyką podaną w rozdziale 4.4.2. Wykorzystano przygotowane według sposobu podanego w rozdziale 5.1 wyniki prób doświadczalnych. Funkcje modelu Chaboche'a są nieliniowe i dlatego wyniki identyfikacji ich parametrów mogą być niejednoznaczne i przyjęcie wartości początkowych mogłoby mieć wpływ na uzyskany wynik. Wobec braku odpowiednich danych w literaturze, odnośnie parametrów tego modelu dla tkaniny, postanowiono wykorzystać jako parametry startowe wyniki identyfikacji zamieszczone w tabeli 5.6.

Ze względu na dużą liczbę prób podzielono je najpierw na grupy (w każdej grupie znalazły się próby z różnymi prędkościami odkształcenia). Wartości początkowe parametrów pochodziły najpierw z identyfikacji numerycznej, a w następnych grupach z wyników identyfikacji w poprzedniej grupie. Takie postępowanie pozwoliło uniknąć trudności numerycznych związanych z niejednoznacznością rozwiązania. Końcowy wynik identyfikacji parametrów modelu uzyskany został przy obliczeniach przeprowadzonych dla wszystkich prób jednocześnie z parametrami startowymi z ostatniej identyfikacji grupowej.

Otrzymane podczas identyfikacji bezpośredniej na podstawie prób doświadczalnych wartości parametrów materiałowych prawa Chaboche'a zestawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7

Stała	Jednostka	Wartość parametru
k	N/m	8593.0
K	N/m	55836.0
n	-	1.80
a	N/m	374762.0
c	-	201.7
b	-	6.52
R_1	N/m	33558.0
γ	s ⁻¹	1.0

Podkreślić należy, że podczas identyfikacji analizowano wpływ poszczególnych poszukiwanych parametrów na wynik końcowy. Współczynnik determinacji R^2 , sygnalizujący czy obliczane zmienne wpływają na jakość aproksymacji, zawierał się w przedziale 1.00 do 0.98. Wartość 1.00 oznacza tu pełną zgodność parametrów funkcji wybranej do aproksymacji oraz samej funkcji z analizowaną krzywą doświadczalną.

5.5. Uwagi dotyczące identyfikacji

Można zauważyć, że odrzucenie wyników kilku prób w czasie identyfikacji parametrów modelu Bodnera-Partoma nie wpłynęło w zasadniczy sposób na wartość uzyskanych parametrów. Porównanie tabeli 5.3 i 5.4 wykazuje, że tylko wartość parametru m_2 zmieniła się więcej niż o 5%. Tym niemniej wartości z tabeli 5.3 użyte do numerycznej symulacji prób cyklicznego obciążenia powodowały trudności z uzyskaniem fizycznie uzasadnionych wartości parametrów modelu Chaboche'a. Tego efektu nie było w przypadku użycia parametrów z tabeli 5.4. Wskazuje to na znaczną czułość modelu na zmianę wartości parametru m_2 i konieczność szczególnie starannej identyfikacji tej wielkości.

Porównanie wyników uzyskanych dla modelu Chaboche'a z identyfikacji numerycznej i bezpośredniej (tabela 5.6 i 5.7) wskazuje na dość zasadnicze różnice wartości niektórych parametrów (szczególnie dotyczy to parametru a). Idea obliczenia parametrów na podstawie symulacji numerycznej, a tylko pośrednio na podstawie doświadczeń, siłą rzeczy stwarza możliwość wystąpienia większych błędów. Tak więc w przy-

padku niezgodności tych wyników w porównaniu z wynikami identyfikacji bezpośredniej należy raczej przyjmować wyniki z identyfikacji bezpośredniej. Tym niemniej takie rozbieżności mogą też wskazywać na znaną z literatury ([6], [17]) skłonność do niejednoznaczności wyników identyfikacji w tym modelu. Dlatego po identyfikacji wydaje się niezbędne przeprowadzenie weryfikacji otrzymanych wyników. Propozycję takiej weryfikacji można znaleźć w rozdziale 6.

Należy podkreślić, że autor napotkał na znaczne trudności z identyfikacją niesprężystych parametrów materiałowych w kierunku wątku. Trudności pojawiały się już na etapie identyfikacji parametrów sprężystych, a potem w czasie użycia metody najmniejszych kwadratów. Procesy regresji były bądź rozbieżne, bądź wartość współczynnika determinacji R^2 była mała w porównaniu z jednością, co wskazuje na niezgodność aproksymowanych funkcji. Przyczyn takich trudności może być kilka:

- wspomniana już wcześniej specyfika tkania tkaniny technicznej „Panama”, która powoduje niejednorodność cech tkaniny w kierunku wątku,
- zmiana właściwości sprężystych w trakcie deformacji powoduje trudności z określeniem granicy sprężystości, a przez to z doбором odpowiedniego fragmentu danych doświadczalnych do identyfikacji,
- przyjęta metoda identyfikacji wymaga bardzo starannego przeprowadzenia prób i stosowania urządzeń o wysokiej klasie rejestracji wyników, a być może przeprowadzenie badań na maszynach wytrzymałościowych, w których byłaby możliwość rejestracji wyników także w czasie odciążania próbki, pozwoliłaby na dokładniejszą identyfikację⁵⁾.

Z tych powodów autor niniejszej rozprawy postanowił zrezygnować z identyfikacji parametrów materiałowych obu modeli lepkoplastycznych na podstawie przeprowadzonych badań jednoosiowego rozciągania na kierunku wątku. Aby uzyskać jednak możliwość wykorzystania otrzymanych rezultatów dla tkanin technicznych, dla kierunku wątku przyjęto następujące założenia:

- producent tkaniny „Panama” deklaruje, że osnowa i wątek wykonane są z jednakowych nici,

⁵⁾ Maszyna wytrzymałościowa Zwick 147670 umożliwia rejestracją wyników tylko w trakcie obciążenia. Autorowi nie udało się dotrzeć do maszyn wytrzymałościowych rejestrujących komputerowo potrzebne do identyfikacji funkcje w trakcie odciążania.

- przyjęto, że w zakresie sprężystym będą wykorzystane wartości modułów sprężystości uzyskane z identyfikacji dla wątku i osnowy,
- w trakcie pracy dwuosiowej zakres niesprężystych odkształceń nici w kierunku wątku (decydujący o wytrzymałości tkaniny) rozpoczyna się, gdy nici w obu kierunkach są już napięte. Można więc założyć, że w tym zakresie wpływ pokrycia tkaniny (znacznie słabsze właściwości mechaniczne) i skarbowania można pominąć,
- z tych powodów można przyjąć parametry niesprężyste wyliczone dla osnowy także dla wątku,
- konieczna jest weryfikacja takiego postępowania poprzez symulacje prób rozciągania w kierunku wątku (patrz rozdział 6), lub dla rzeczywistych konstrukcji wiszących z tkaniny „Panama”.

6. Weryfikacja wyników identyfikacji

Porównanie wyników identyfikacji z doświadczeniami jest chyba najlepszym sposobem weryfikacji przeprowadzonych obliczeń. Weryfikację wyznaczonych parametrów materiałowych obu praw wykonano poprzez porównanie wyników doświadczenia z symulacją numeryczną próby jednoosiowego rozciągania. Symulację numeryczną prób, które posłużyły do wyznaczenia stałych materiałowych, przeprowadzono przy wykorzystaniu programów komputerowych opisanych w publikacji [31]. Oryginalny algorytm programów przedstawiono na rys. 6.1. W wyniku obliczeń programów otrzymujemy w formie tabelarycznej zestawione w kolumnach wartości: czas t , krok czasowy Δt , siłę F , przemieszczenie u , odkształcenie całkowite ε , odkształcenie niesprężyste ε_p , prędkość odkształcenia całkowitego $\dot{\varepsilon}$, prędkość odkształcenia niesprężystego $\dot{\varepsilon}_p$, naprężenie σ oraz wartości wzmocnienia. W programach tych wprowadzono modyfikacje pozwalające wykorzystać je do opisu materiału tekstylnego. Modyfikacja polegała na wprowadzeniu innego opisu modelu prawa sprężystego, umożliwiającego zmianę modułu Younga E w trakcie deformacji (wykorzystano to dla symulacji prób dla wątku). Bazę weryfikacji stanowiły wyznaczone parametry materiałowe obu praw. W symulacji uwzględniono rzeczywiste zmiany prędkości odkształcenia zanotowane w trakcie doświadczeń. Wyniki weryfikacji przedstawiono w rozdziałach 6.1 i 6.2. Pomimo iż autor niniejszej rozprawy ze względu na rozbieżności uzyskanych wyników zaniechał identyfikacji parametrów materiałowych obu modeli lepkoplastycznych na kierunku wątku, to jednak prezentowana poniżej weryfikacja odnosi się zarówno do prób badanych na kierunku osnowy jak i wątku. Jediną różnicę w traktowaniu wątku i osnowy stanowi parametr sprężysty, moduł Younga E , którego sposób identyfikacji opisano dokładnie w rozdziale 2.2. Ponieważ zidentyfikowano dwa moduły E dla kierunku wątku, przyjęto że stosowane będą one w następujących zakresach odkształceń:

- pierwszy moduł E_{sr-1} od 0.000 do 0.035 – w tym zakresie pracuje głównie materiał powlekający,
- drugi moduł E_{sr-2} od 0.035 do 0.050, gdy pracuje cały materiał.

Postanowiono tak, gdyż dokładnie trudno jest określić miejsce, w którym wszystkie włókna wątku są już napięte. Natomiast od odkształceń równych 0.035 wyraźnie obserwujemy zmianę kąta nachylenia wykresu i do odkształceń równych 0.050 wykres jest prostoliniowy, rys.6.2.

Dane do programu:

właściwości sprężyste: E lub (E_1, E_2) , l , A

właściwości lepkoplastyczne: $K, k, n, a, b, c, R_0, R_1, m_1, m_2, D_0, D_1$ (w zależności od prawa)

liczba iteracji, dopuszczalny błąd, przyrost czasu, siła: $NS, \eta, \Delta t, F$

$$u = \varepsilon = \varepsilon^l = X_0 = \varepsilon_0^l = \dot{X}_0 = \dot{R}_0 = \Delta \varepsilon_0^l = 0$$

pętla po przyrostach: $j = 1, NS$
(krokach czasowych)

$$\Delta F = F_j - \sigma_{j-1} A$$

$$\Delta \varepsilon_0^l = \Delta \varepsilon_{j-1}^l$$

$$\dot{\varepsilon}_j^l = \dot{\varepsilon}_{j-1}^l$$

$$\dot{X}_j = \dot{X}_{j-1}$$

$$\dot{R}_j = \dot{R}_{j-1}$$

pętla po iteracjach: $i = 1, 2, 3$

$$\Delta \varepsilon^l = \frac{\Delta t_j}{2} (\dot{\varepsilon}_{j-1}^l + \dot{\varepsilon}_j^l)$$

$$\Delta X = \frac{\Delta t_j}{2} (\dot{X}_{j-1} + \dot{X}_j)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta t_j}{2} (\dot{R}_{j-1} + \dot{R}_j)$$

$$\Delta u = \frac{l}{EA} (\Delta F + \Delta \varepsilon_0^l EA)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta u}{l}$$

$$\Delta \sigma = E (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon^l)$$

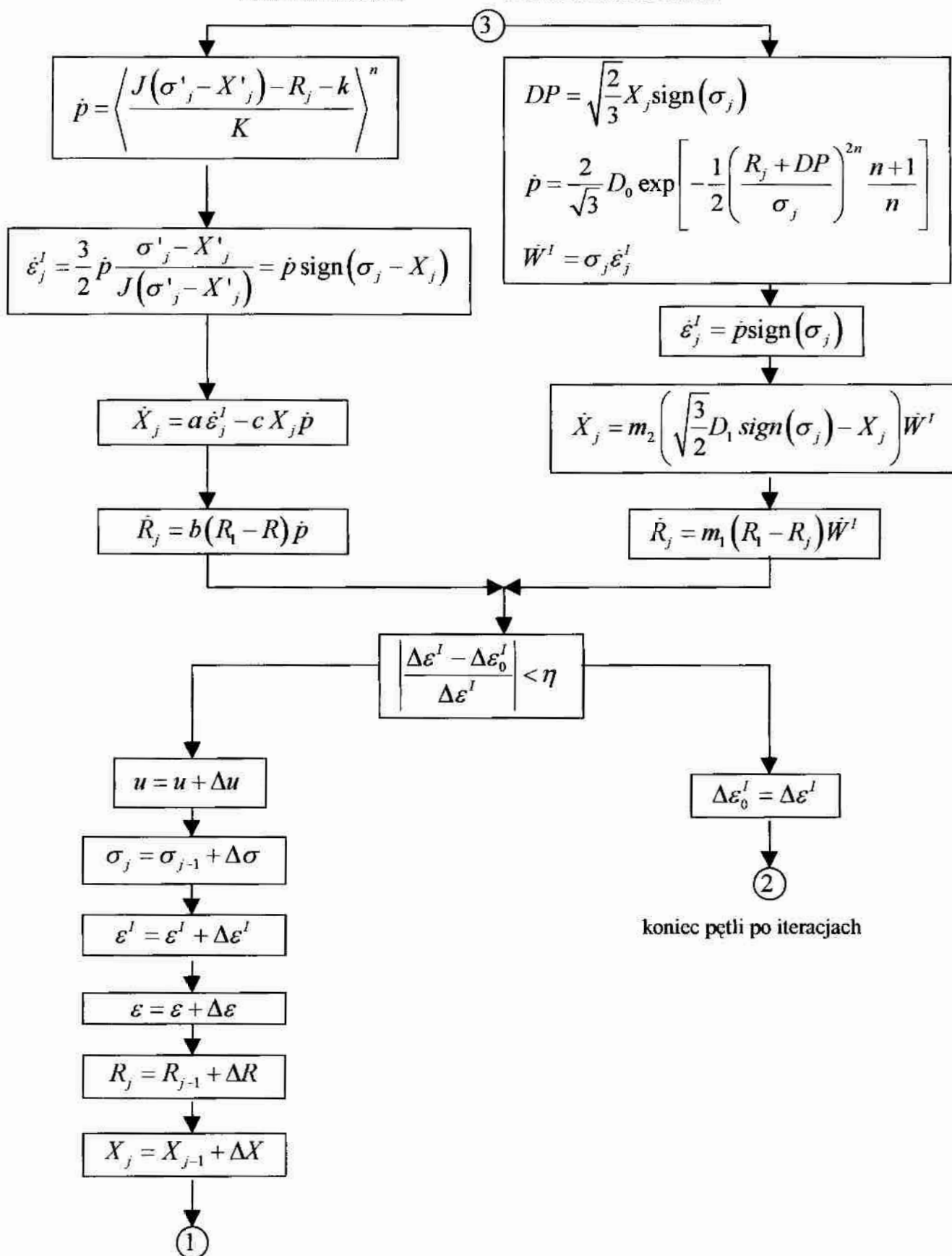
$$\sigma_j = \sigma_{j-1} + \Delta \sigma \quad X_j = X_{j-1} + \Delta X \quad R_j = R_{j-1} + \Delta R$$

$$J(\sigma_j - X_j) = |\sigma_j - X_j|$$

3

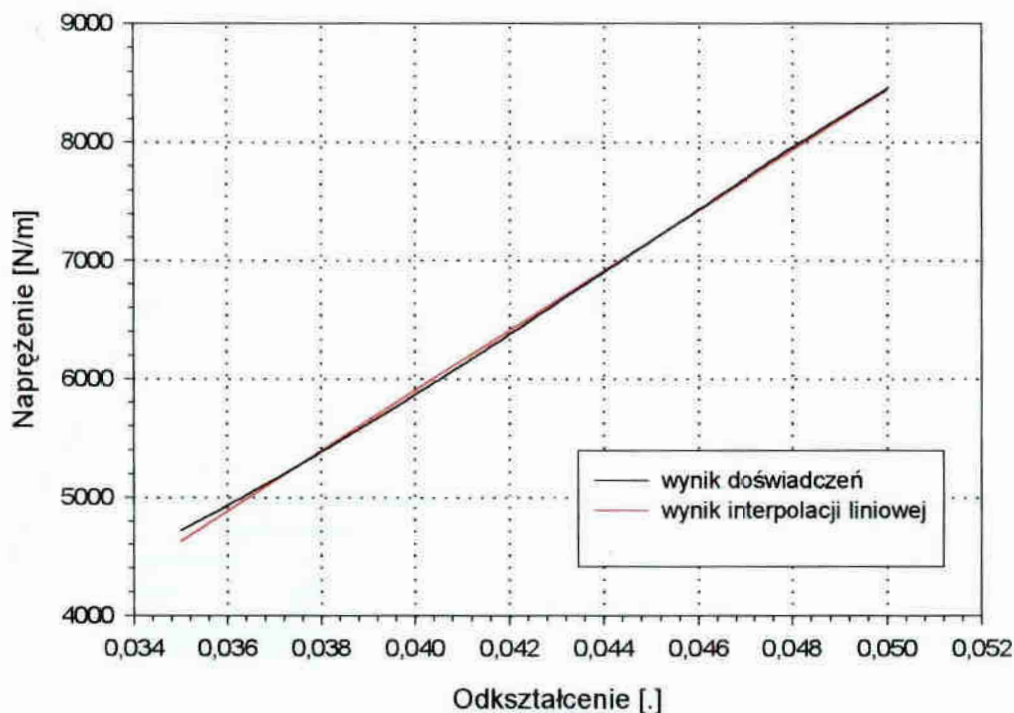
Prawo Chaboche'a

Prawo Bodnera-Partoma



koniec pętli po przyrostach czasowych

Rys. 6.1. Algorytm do statycznych obliczeń elementu sprężysto-lepkoplastycznego



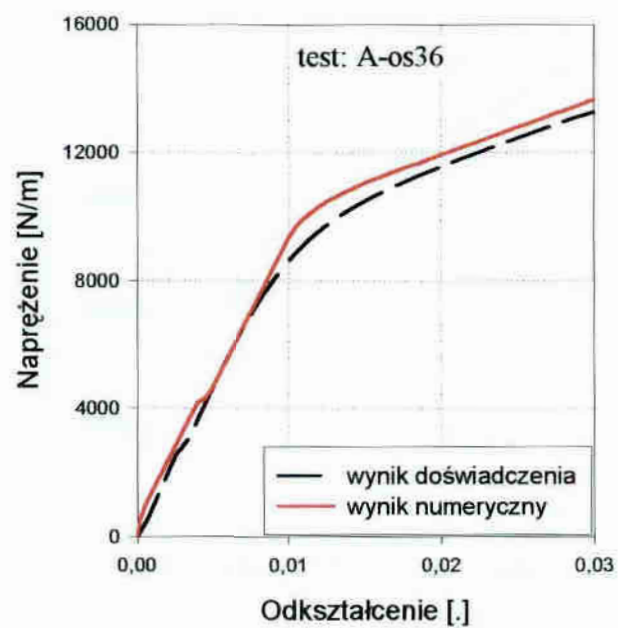
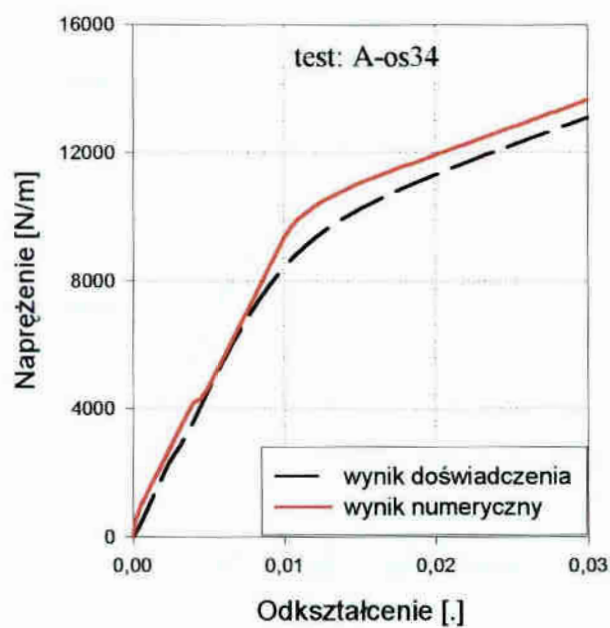
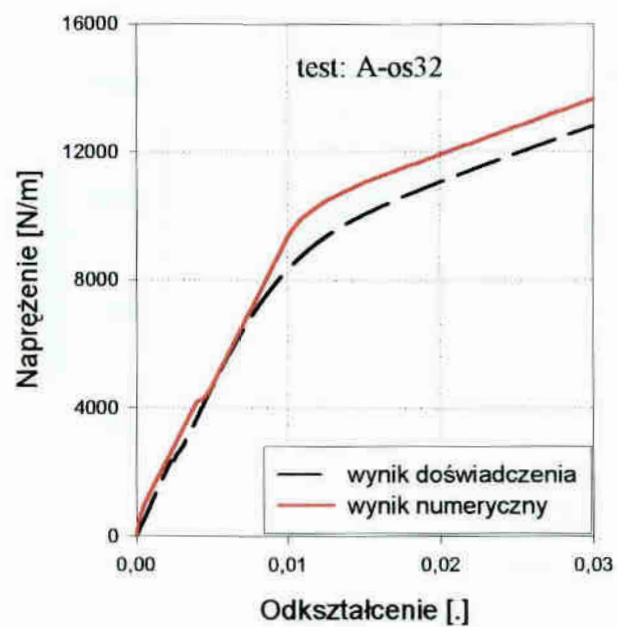
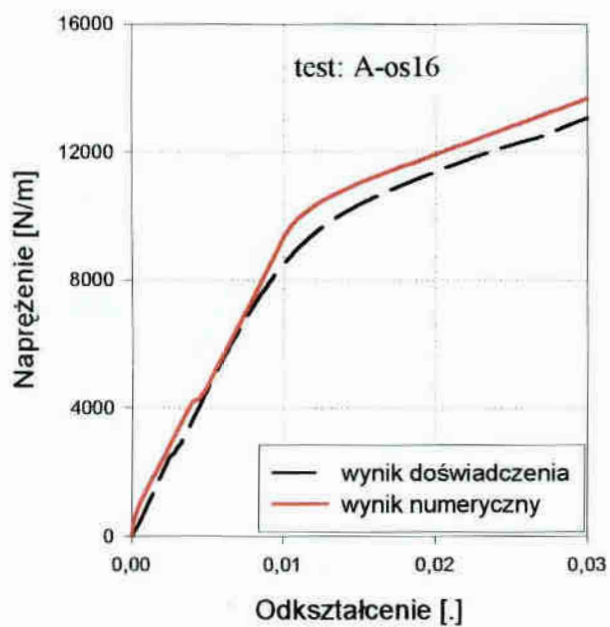
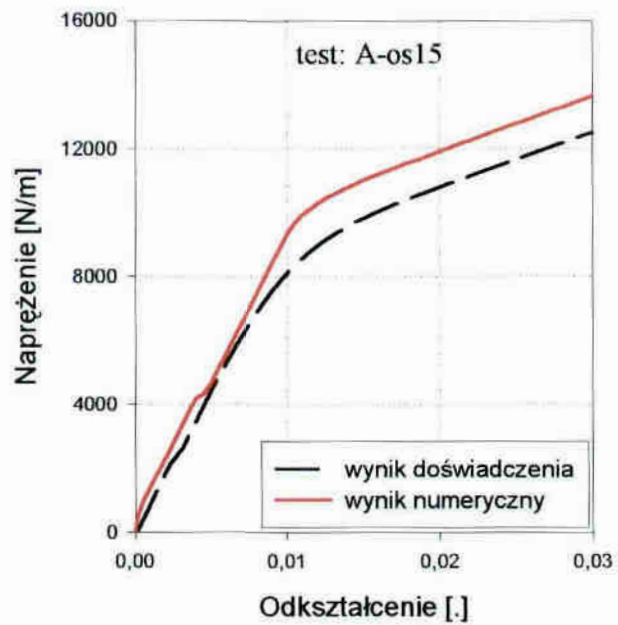
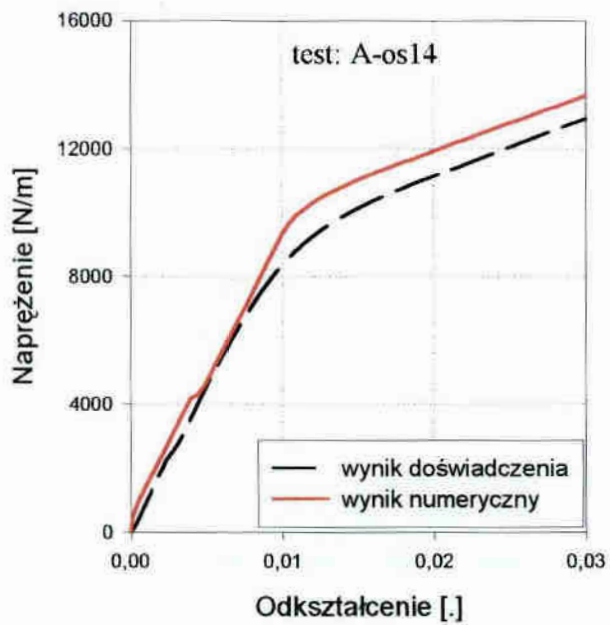
Rys. 6.2. Wykres odkształcenie – naprężenie dla wątku (zakres pracy nici wątku)

Należy również podkreślić, że pomimo iż zakres odkształceń, w którym identyfikowano moduły odkształcalności podłużnej Younga dla kierunku wątku i osnowy, był różny (od 0.000 do 0.008 – osnowa; od 0.035 do 0.050 – wątek), to górny zakres naprężeń odpowiadający odpowiedniemu górnemu zakresowi odkształceń sprężystych był zbliżony i wynosił około 8000 N/m.

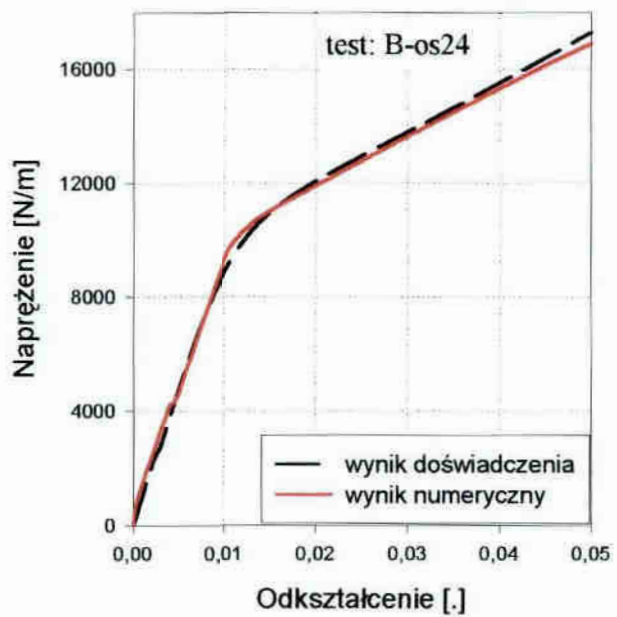
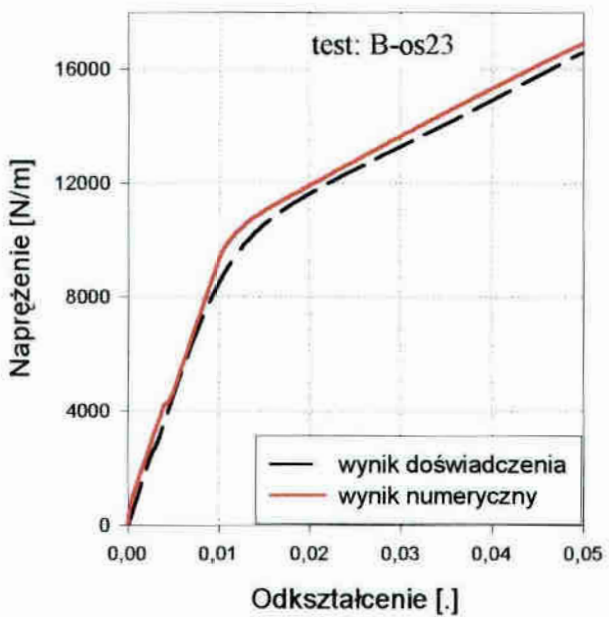
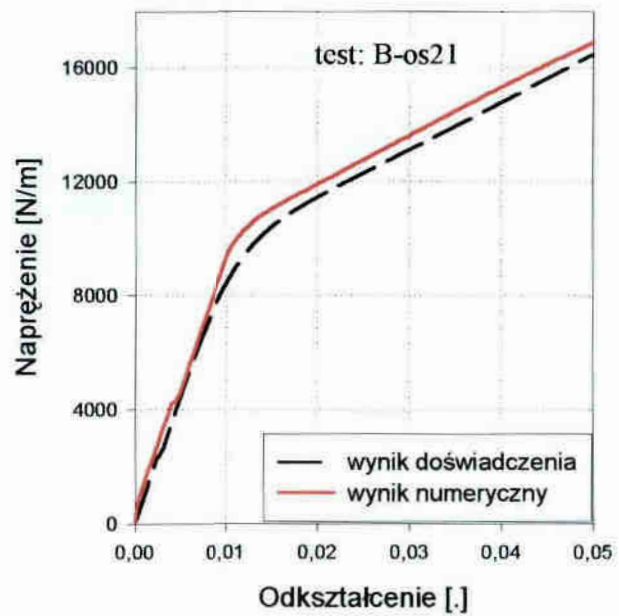
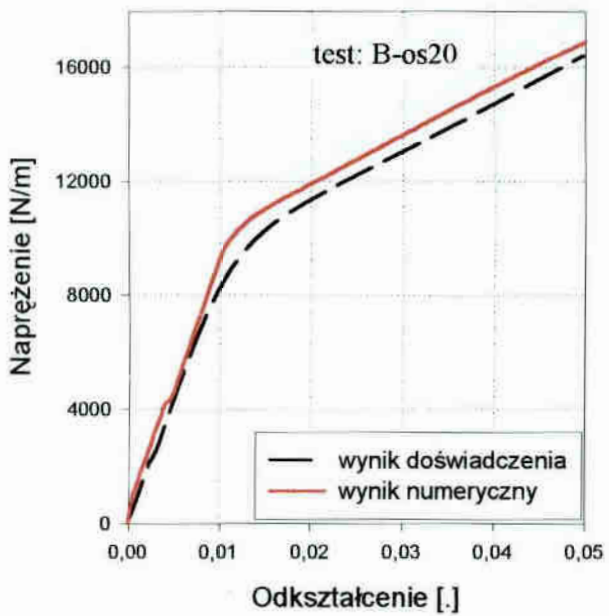
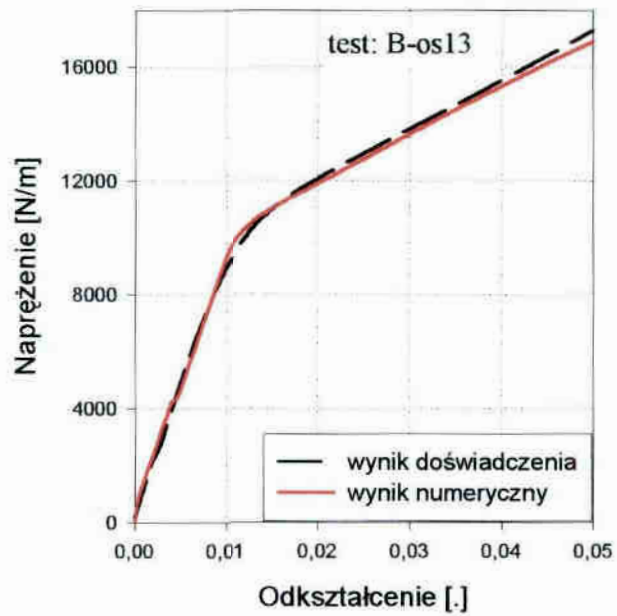
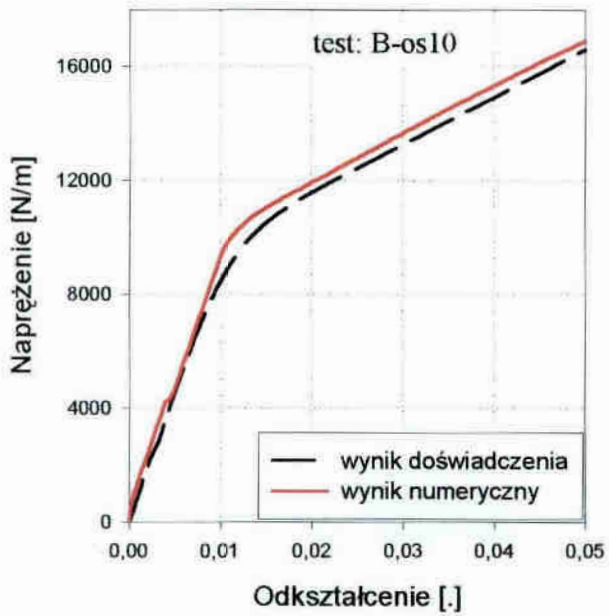
Pozostałe, niesprężyste parametry materiałowe obu modeli praw konstytutywnych (Bodnera-Partoma i Chaboche'a) przyjęto jednakowe dla kierunku osnowy i wątku.

6.1. Weryfikacja wyników identyfikacji parametrów prawa Bodnera-Partoma

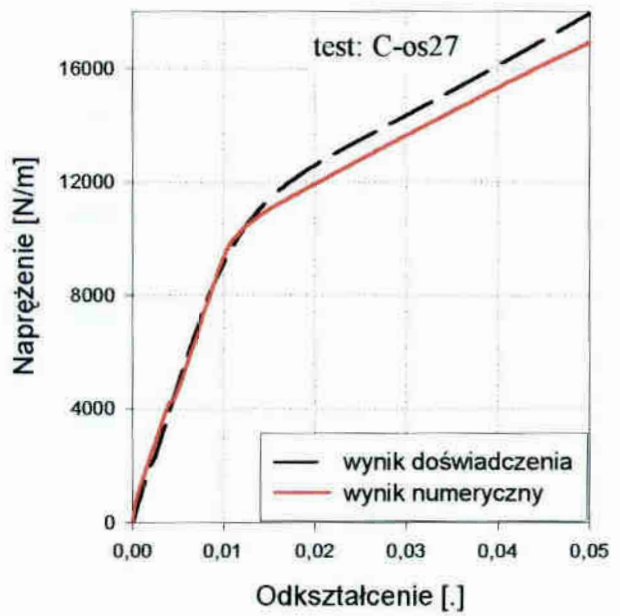
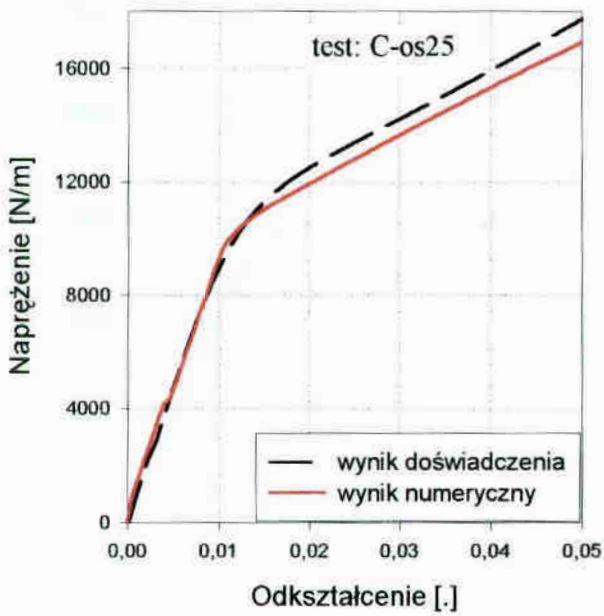
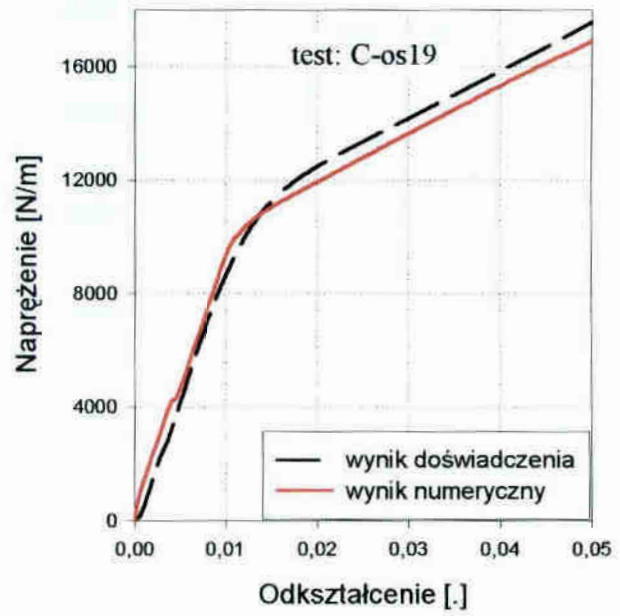
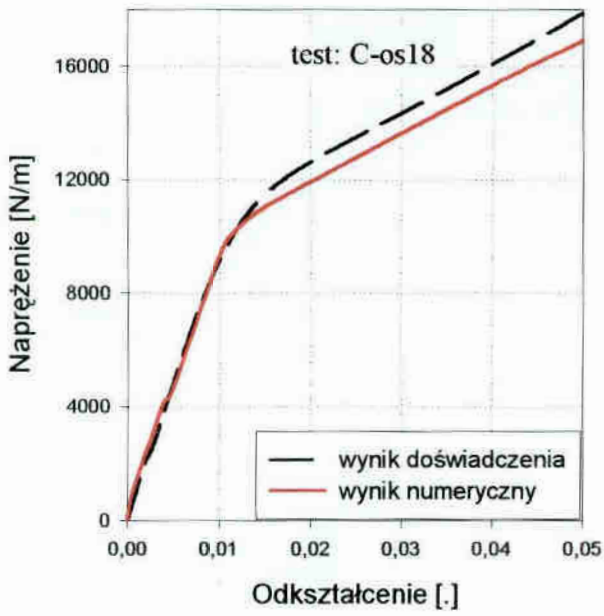
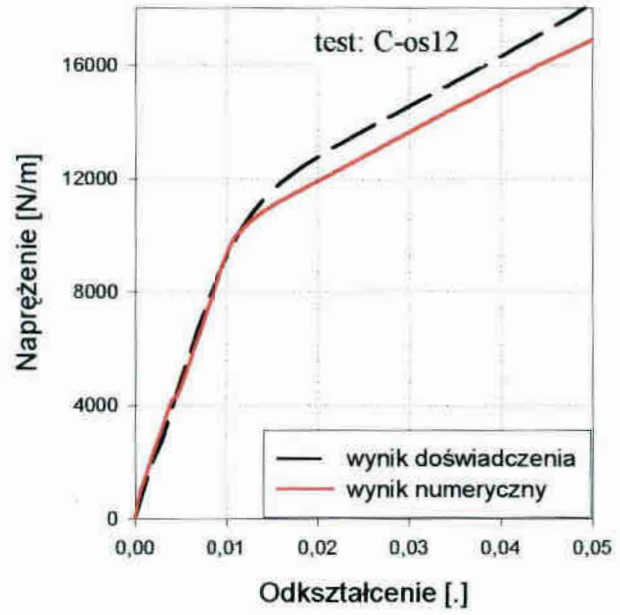
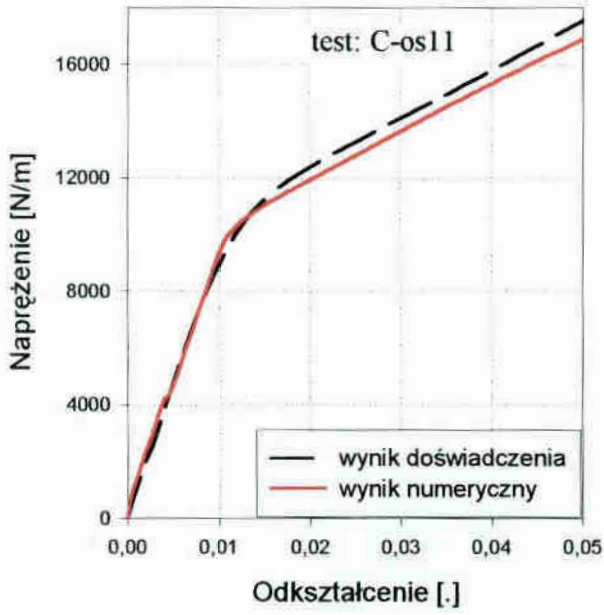
Wyniki weryfikacji parametrów prawa Bodnera-Partoma pokazano dla kierunku osnowy na rys. 6.3-6.6, a dla kierunku wątku na rys. 6.7-6.10. Symulację numeryczną próby jednoosiowego rozciągania wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania opisanego w rozdziale 6.



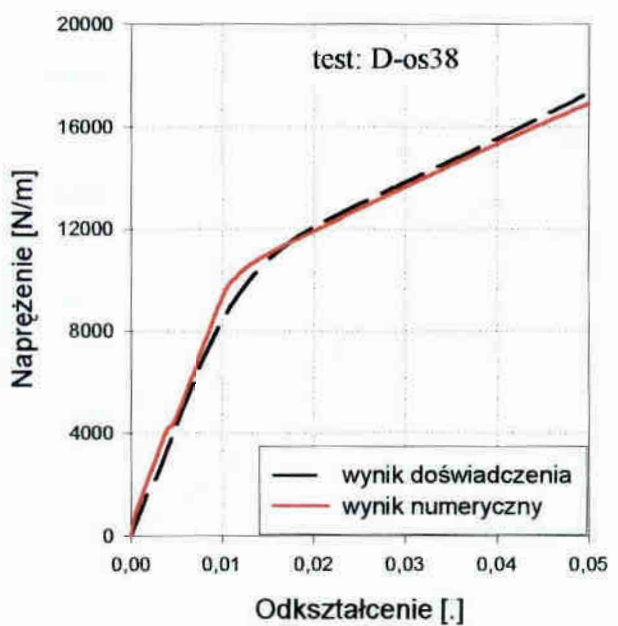
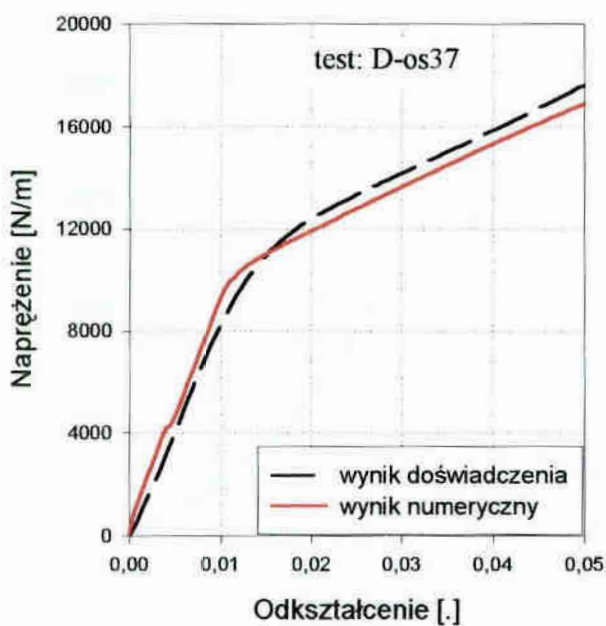
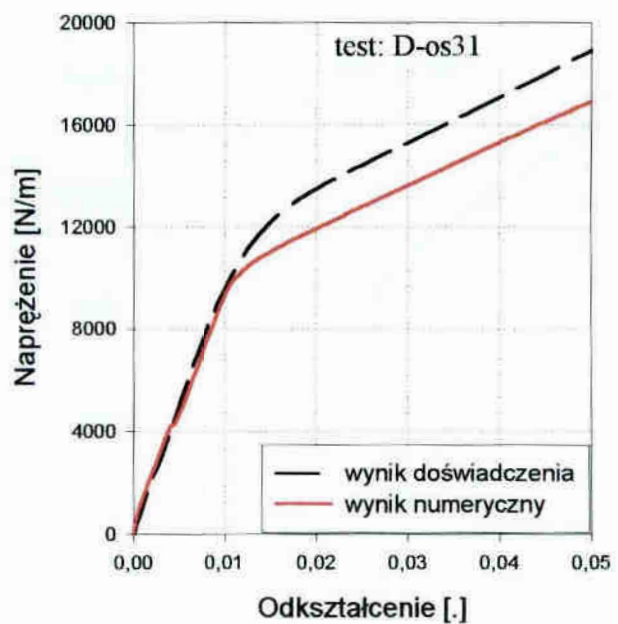
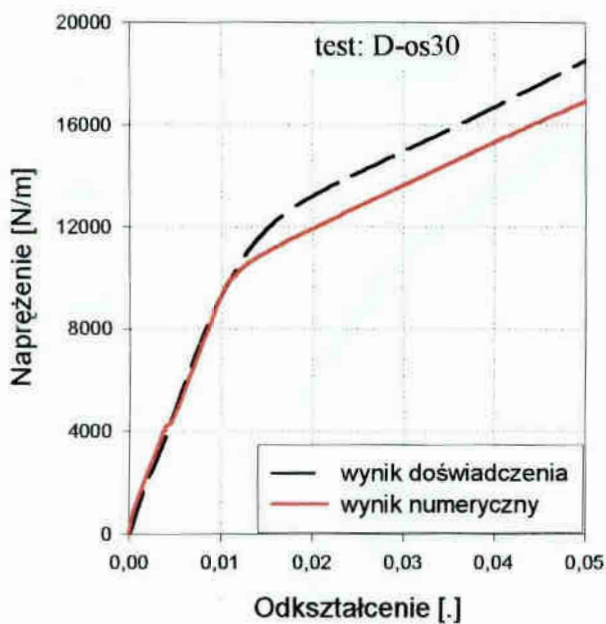
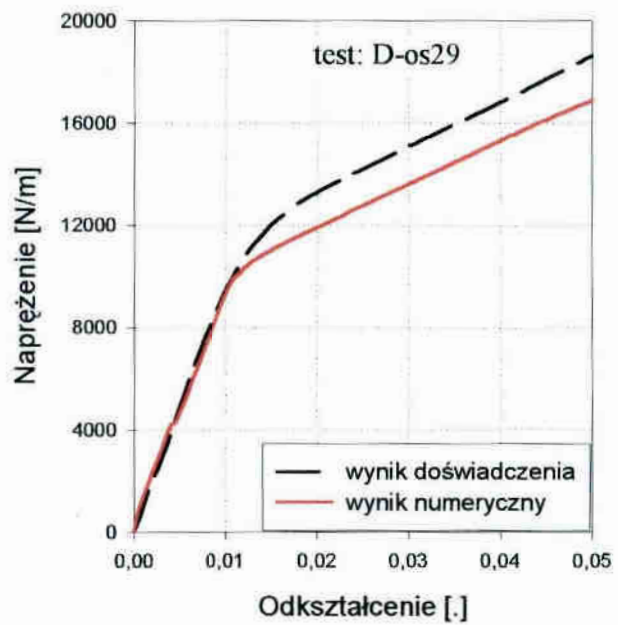
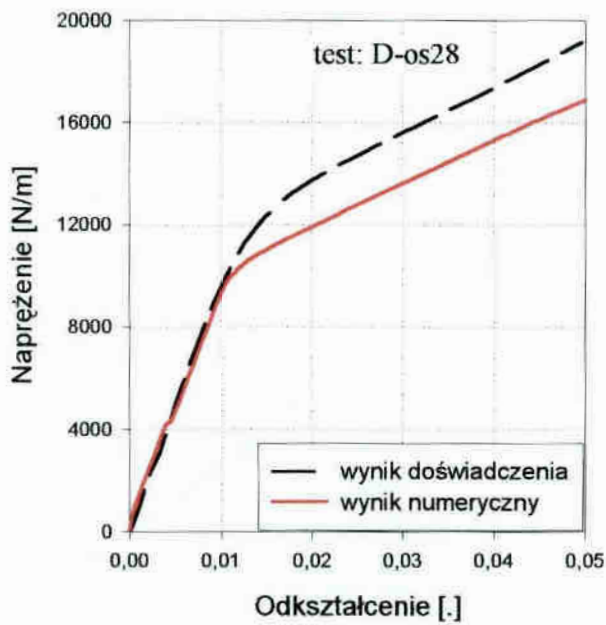
Rys. 6.3. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$)



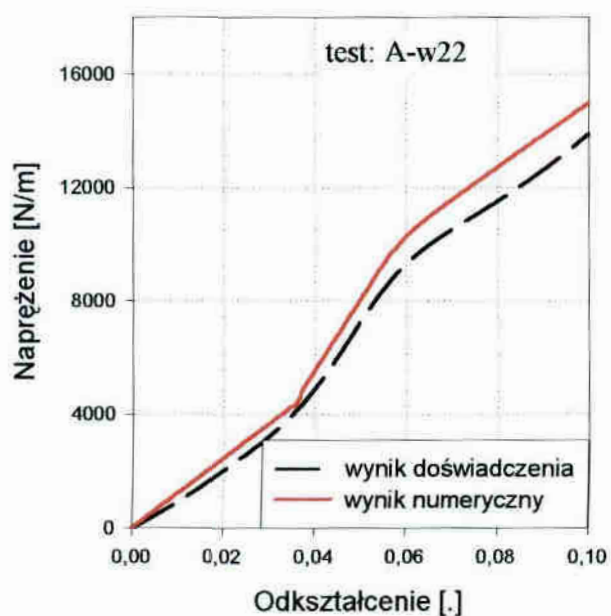
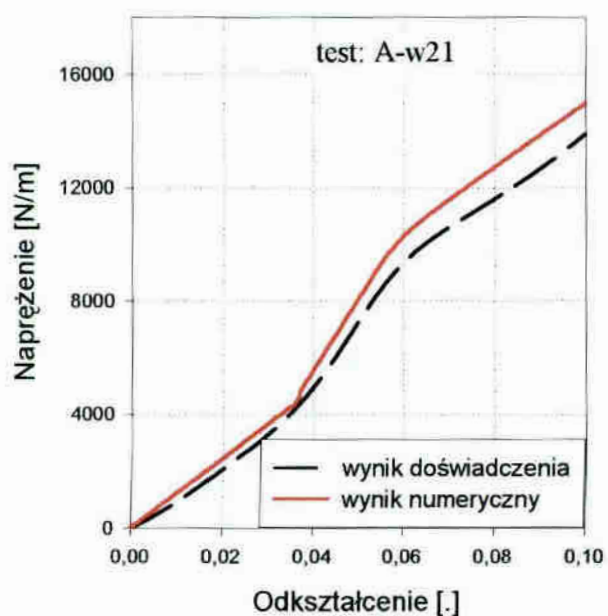
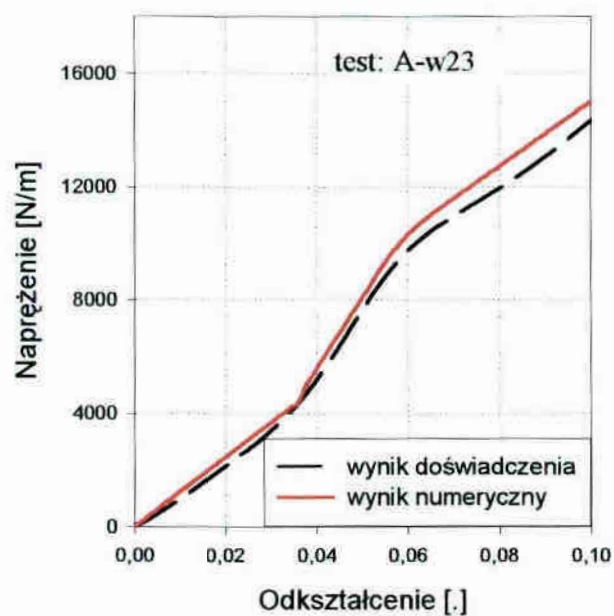
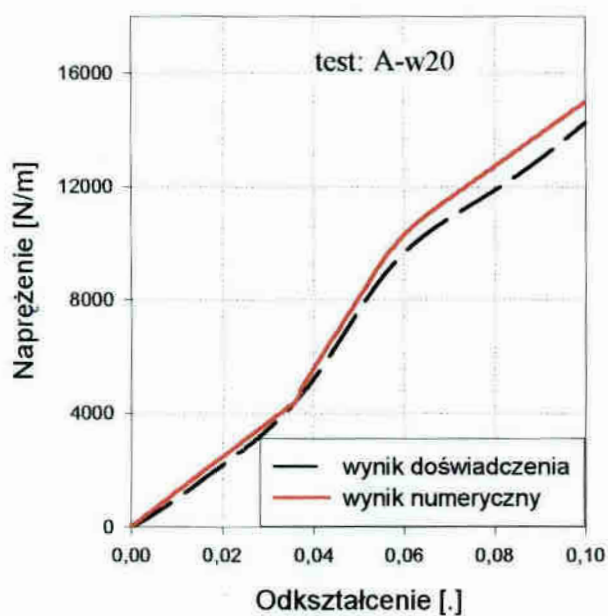
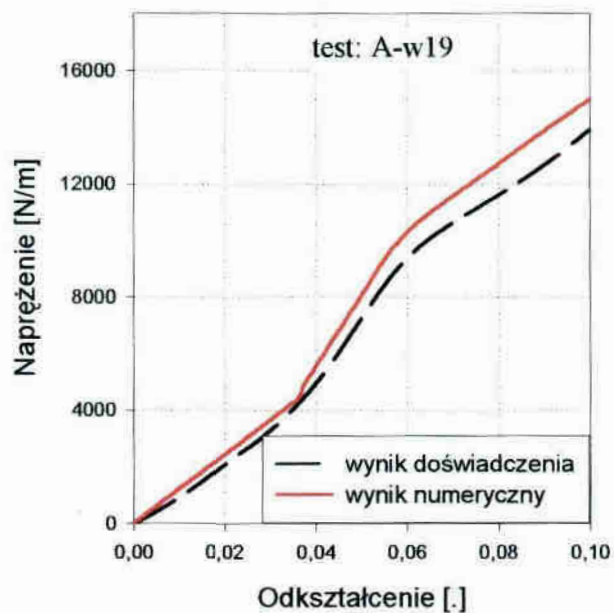
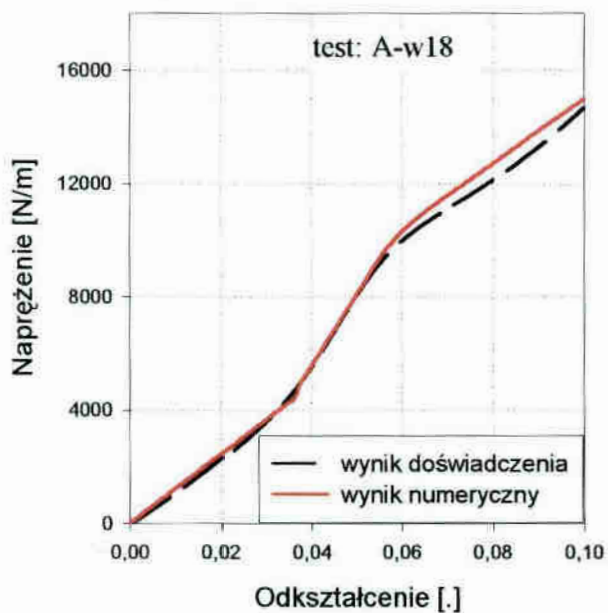
Rys. 6.4. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)



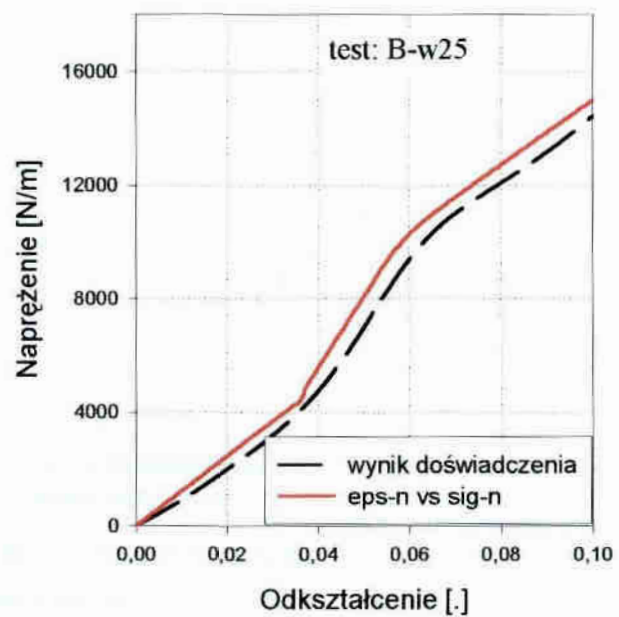
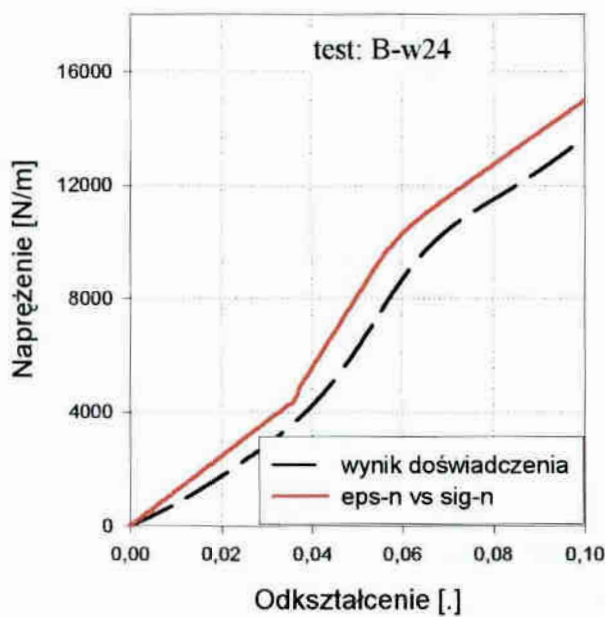
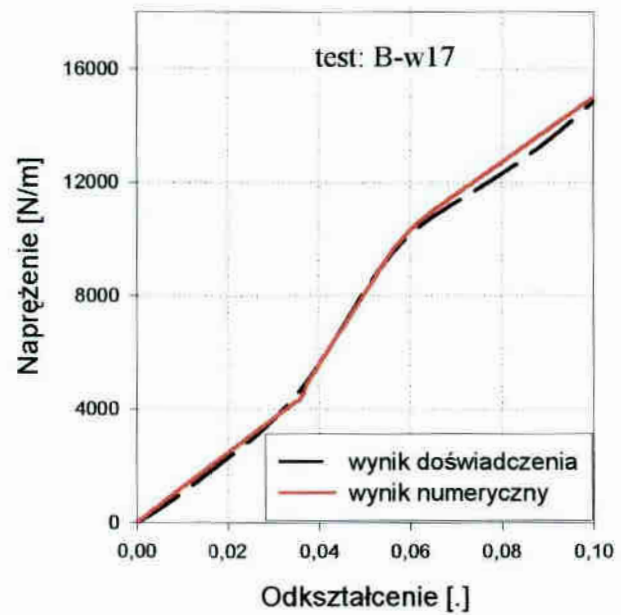
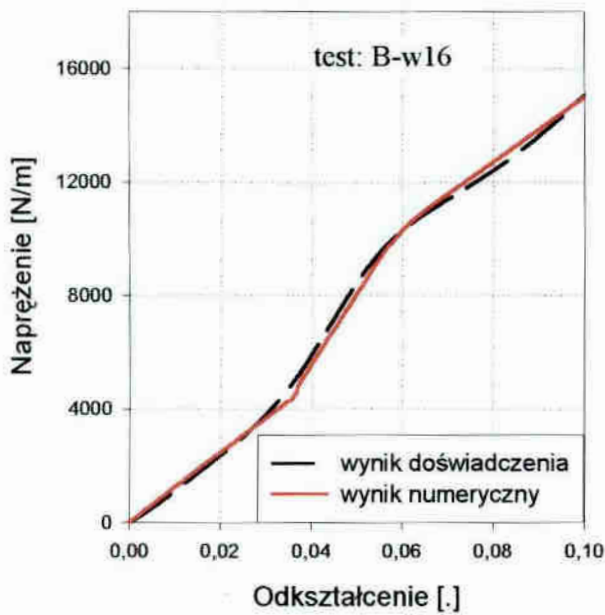
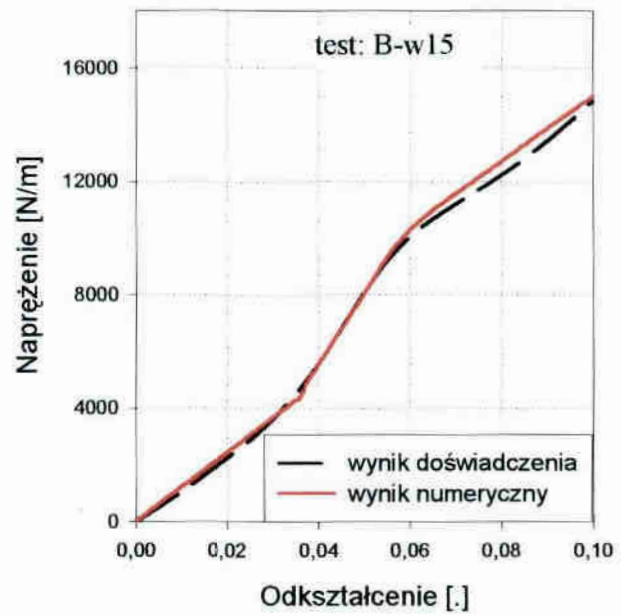
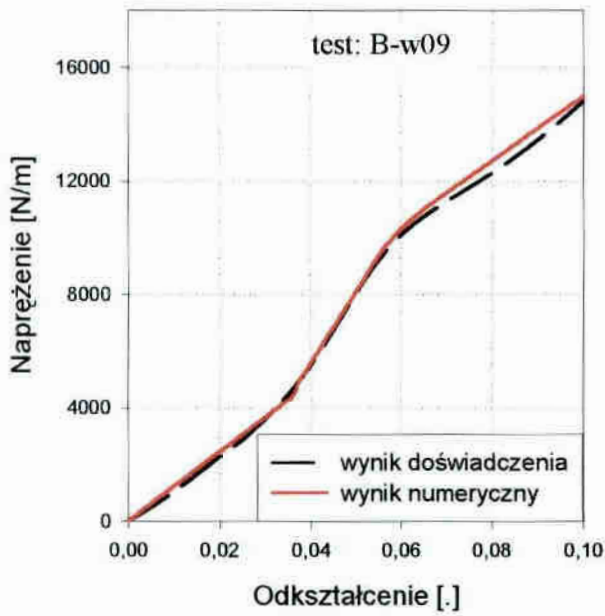
Rys. 6.5. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$)



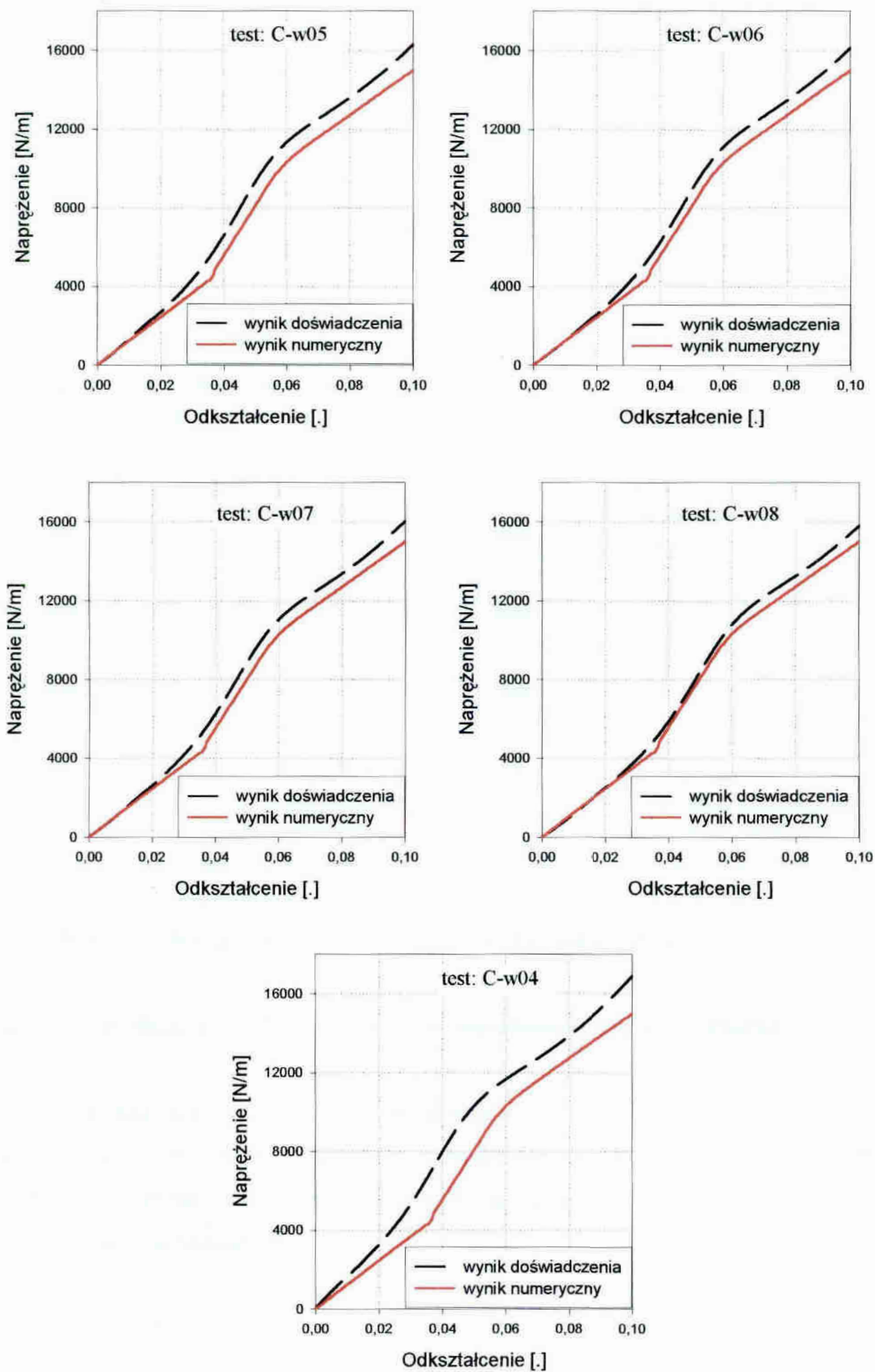
Rys. 6.6. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$)



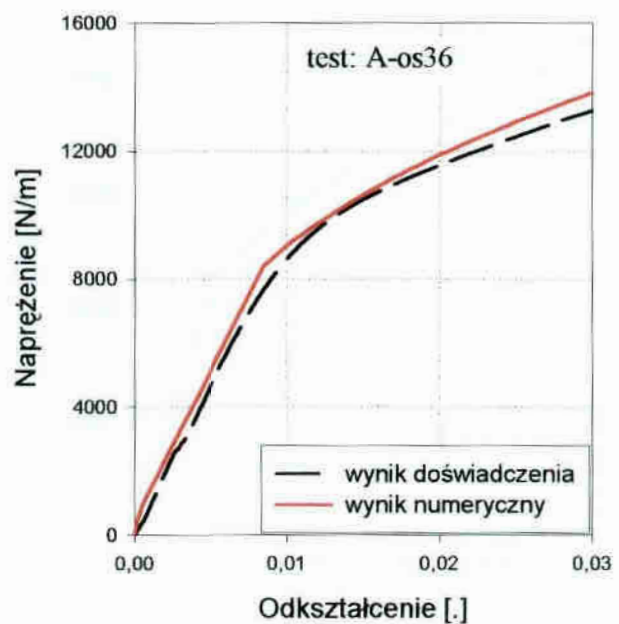
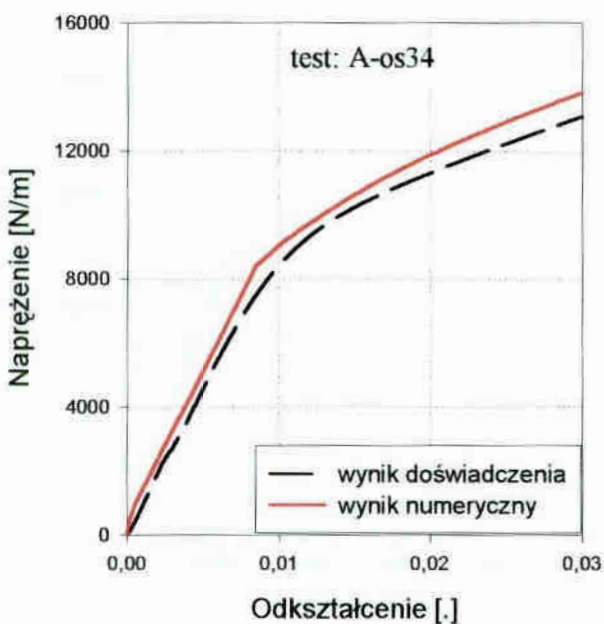
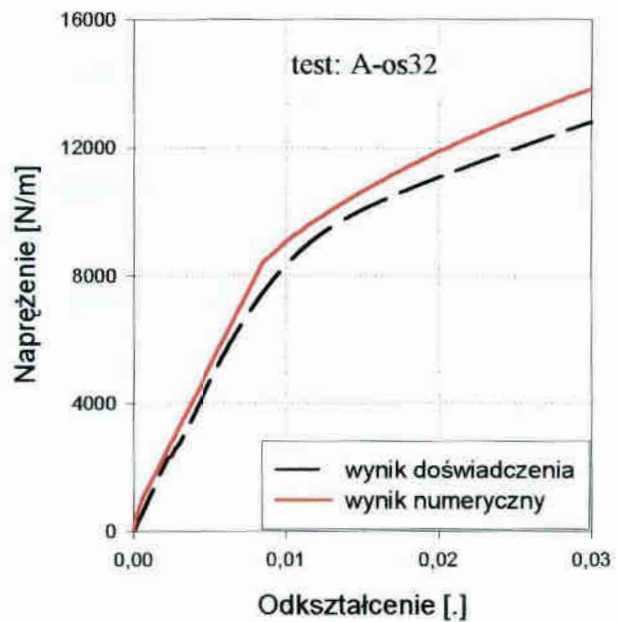
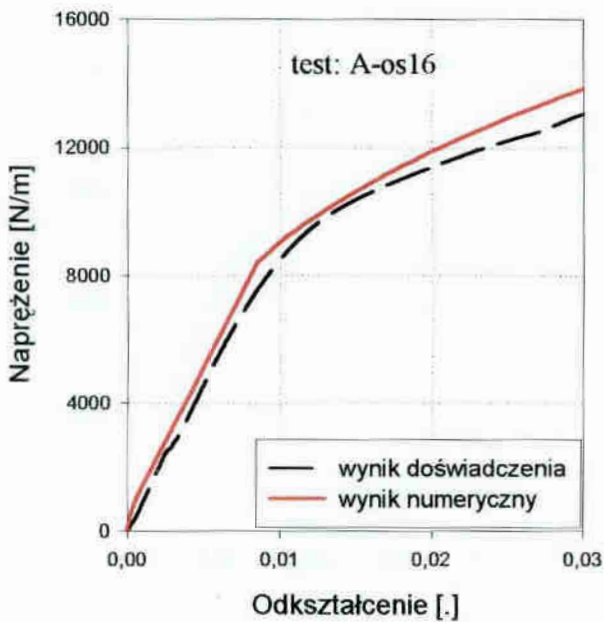
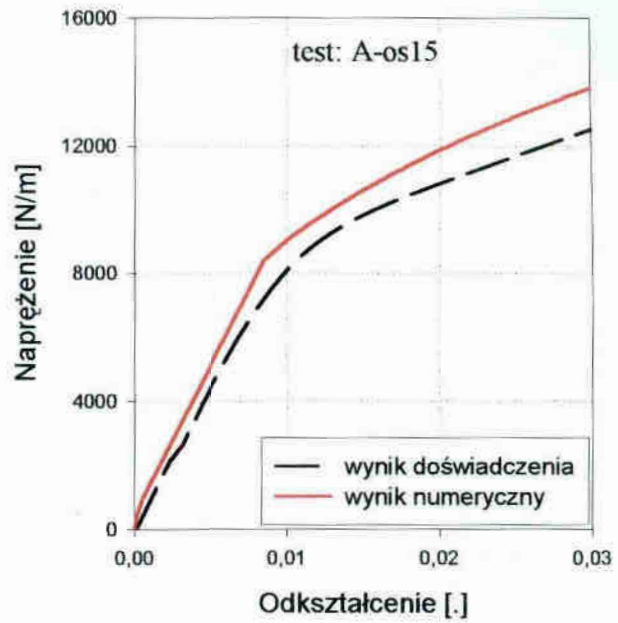
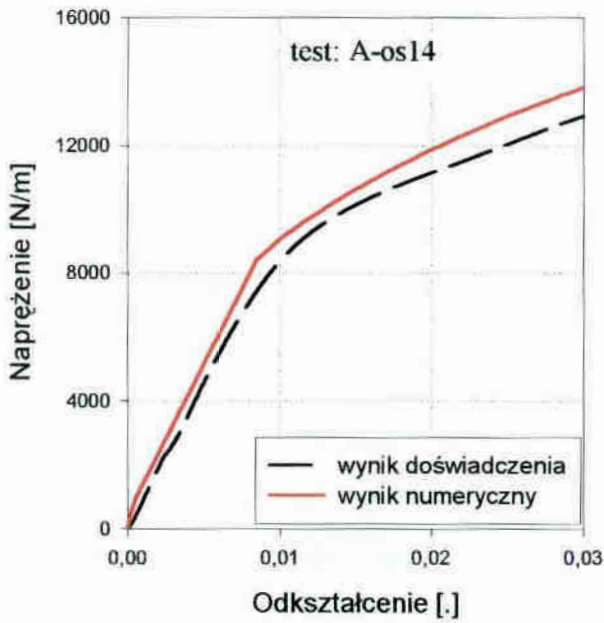
Rys. 6.7. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$)



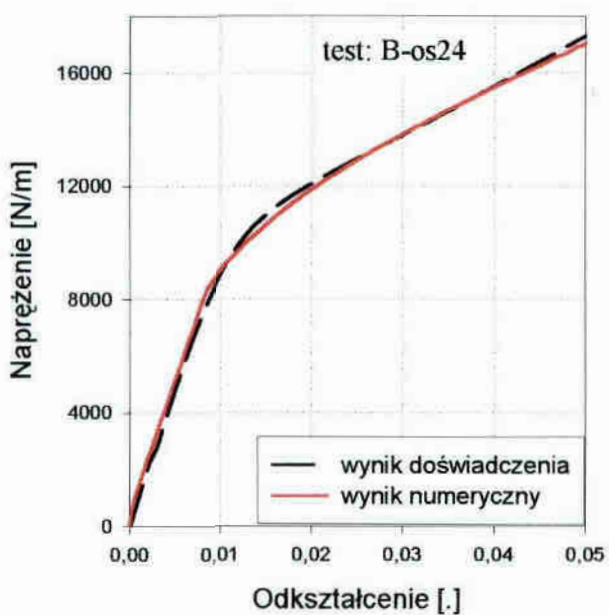
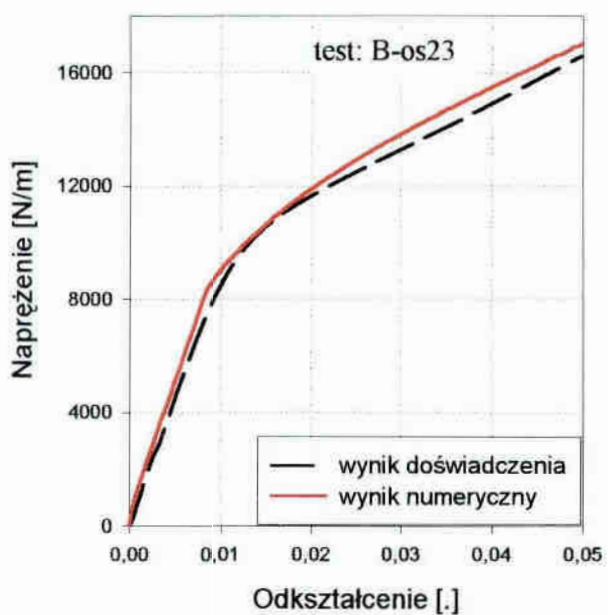
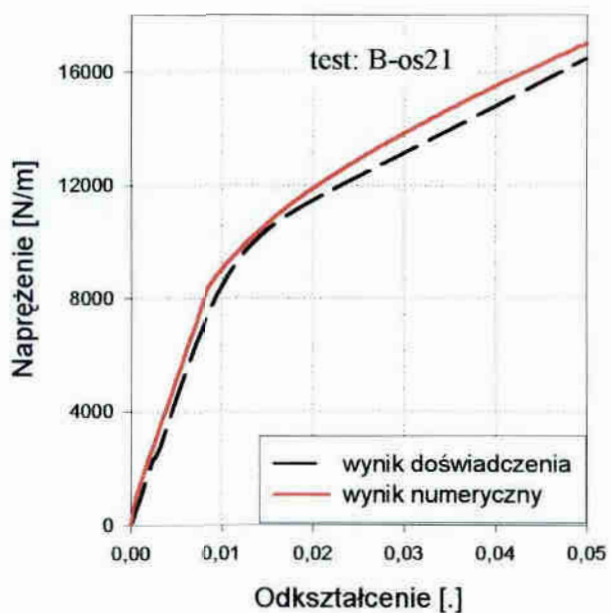
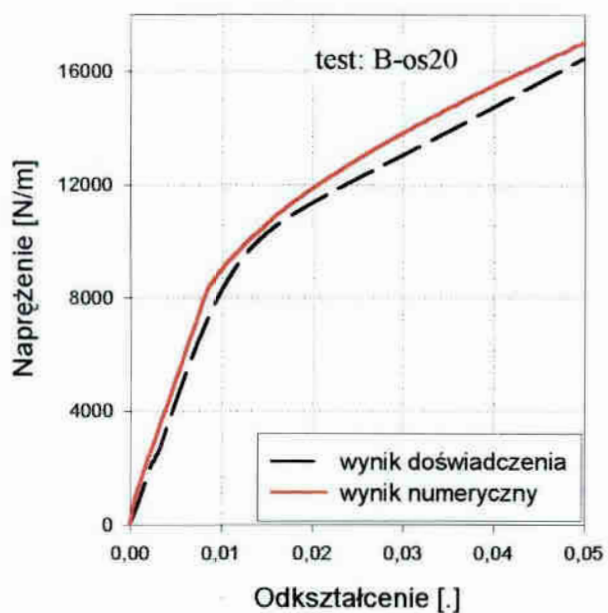
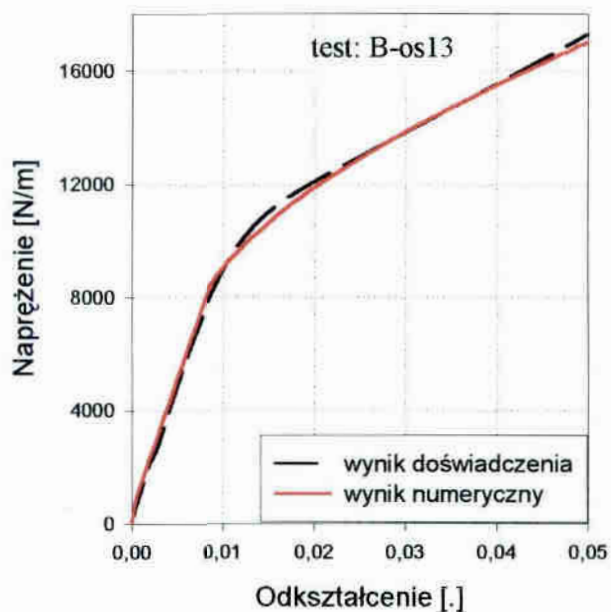
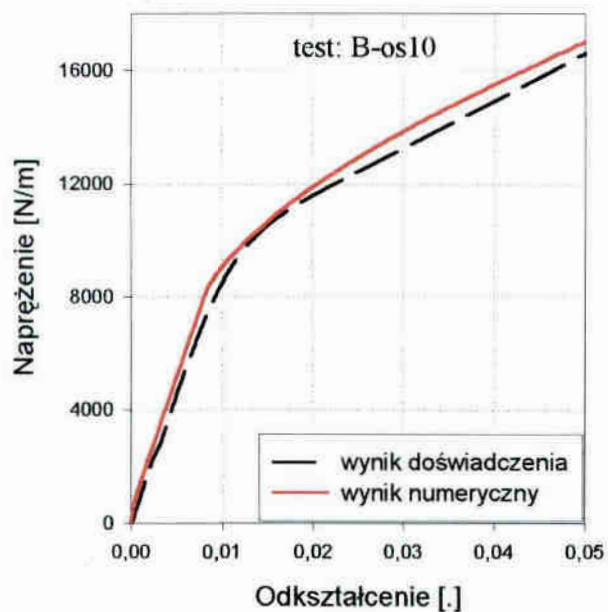
Rys. 6.8. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)



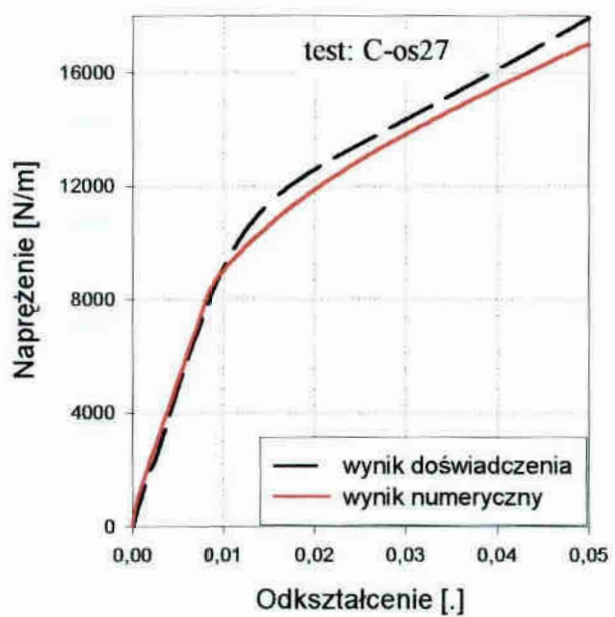
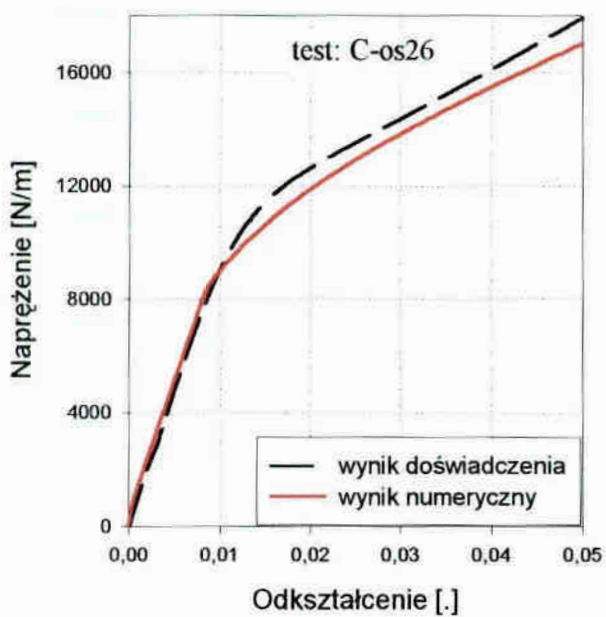
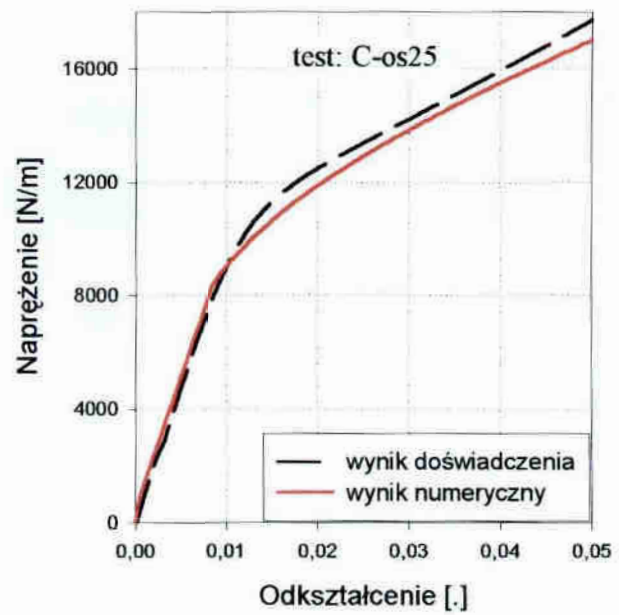
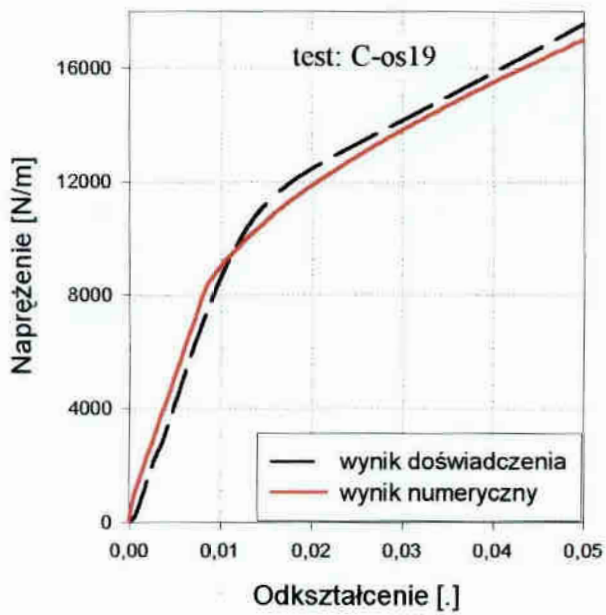
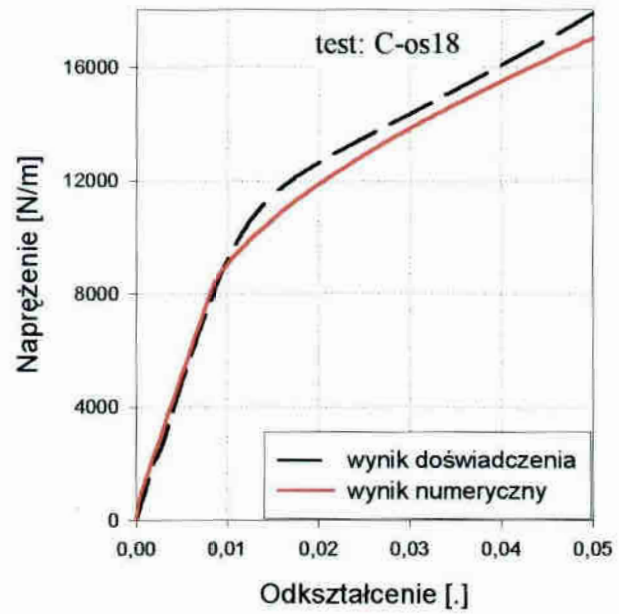
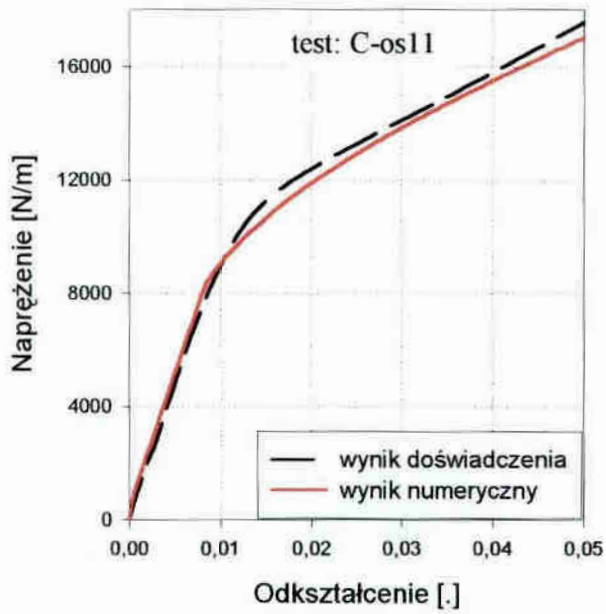
Rys. 6.9. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$)



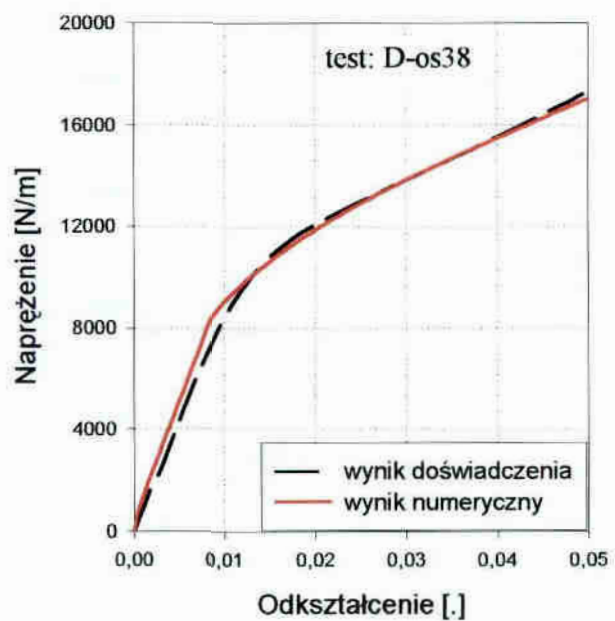
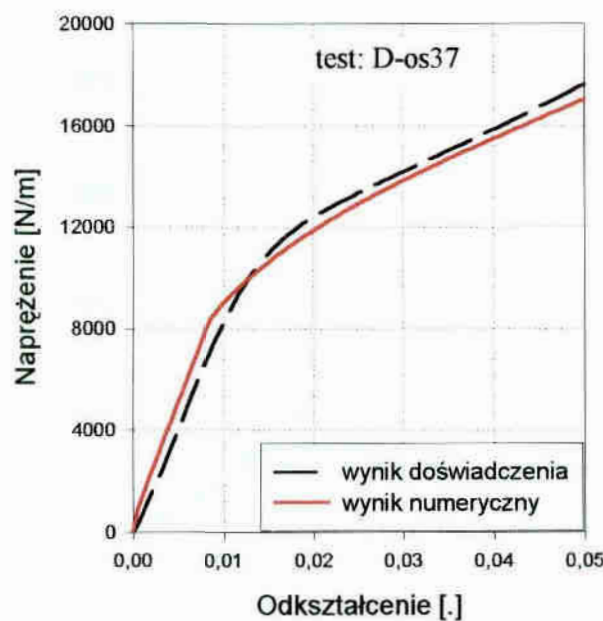
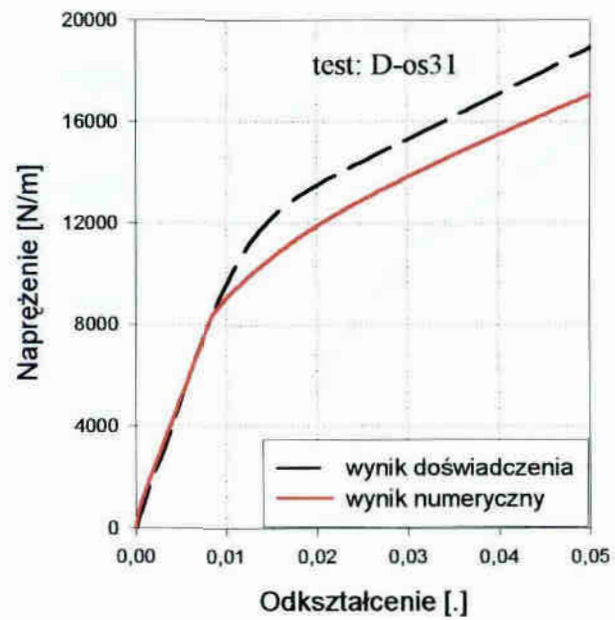
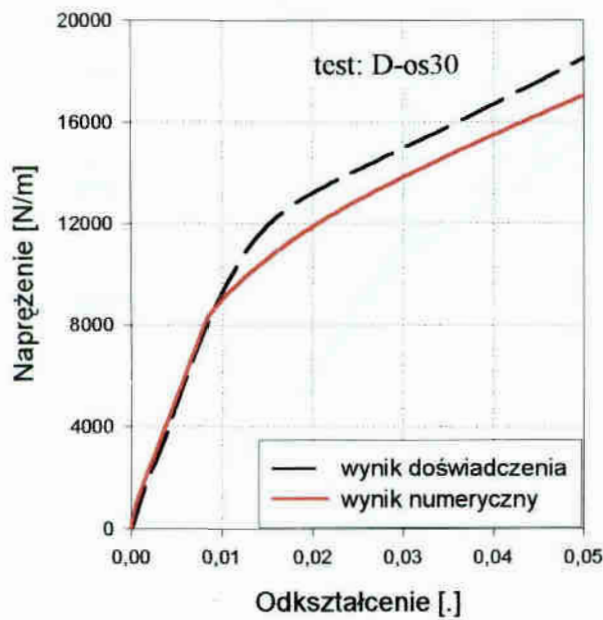
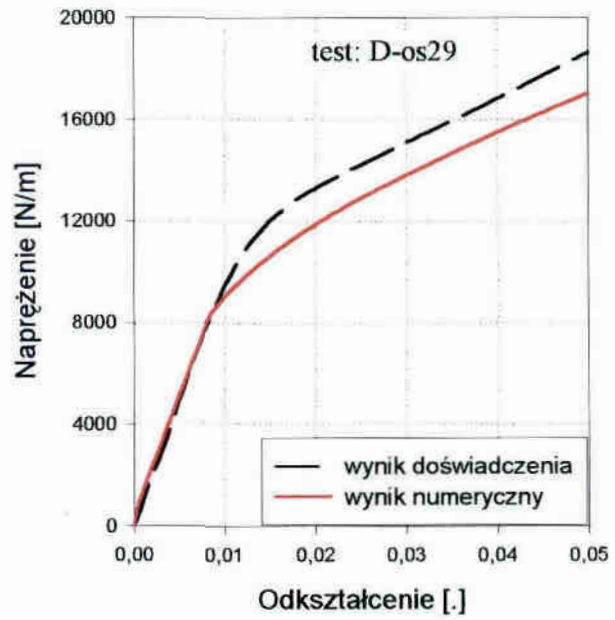
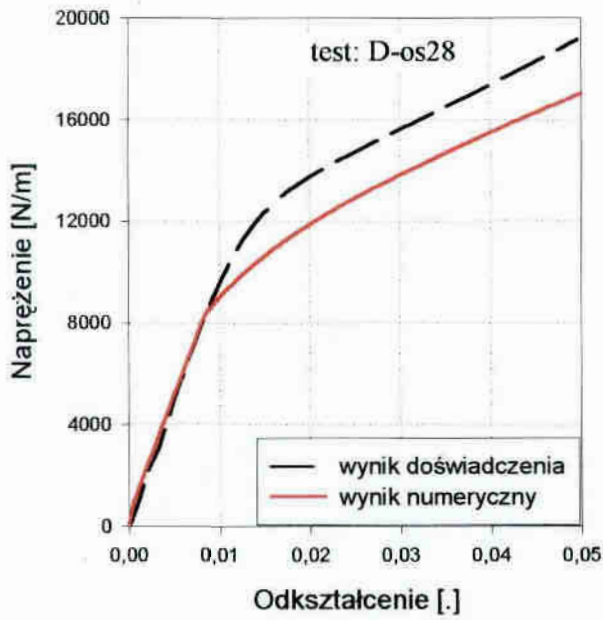
Rys. 6.11. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$)



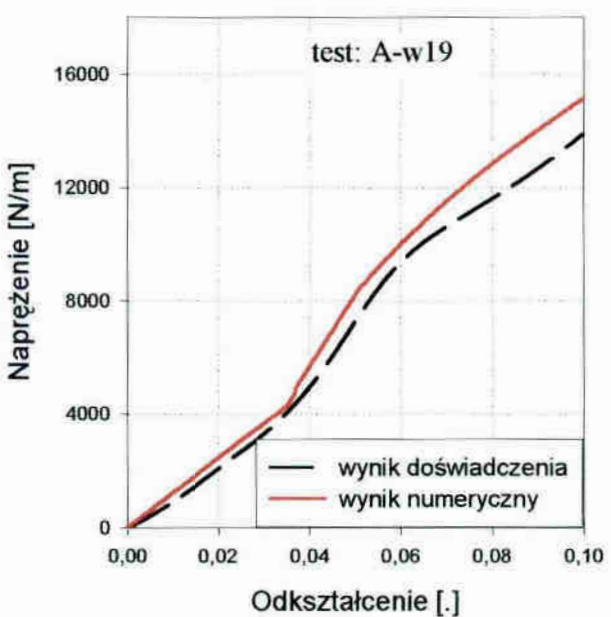
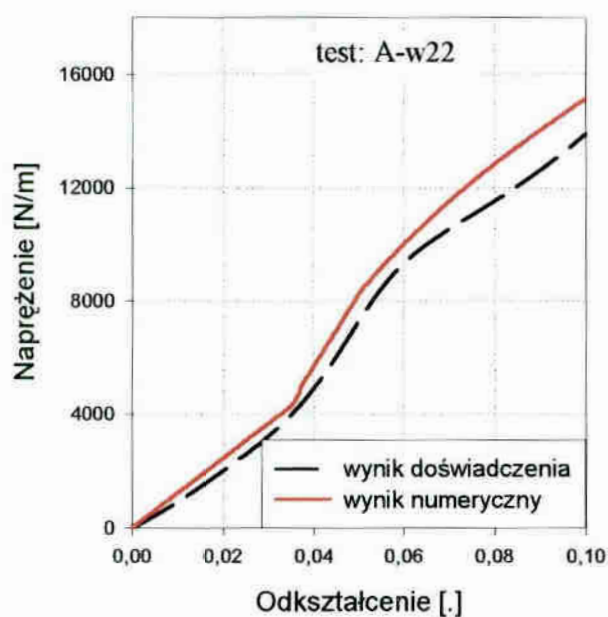
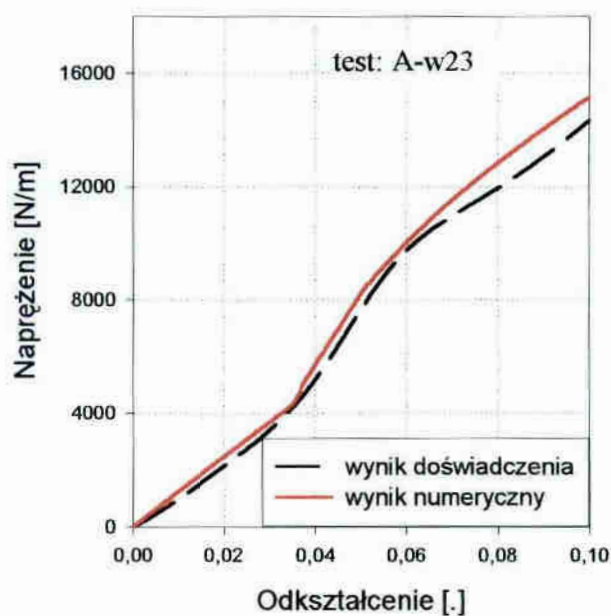
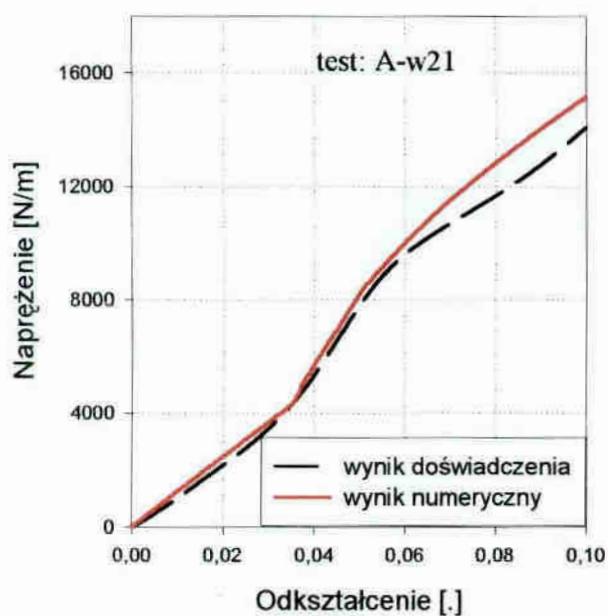
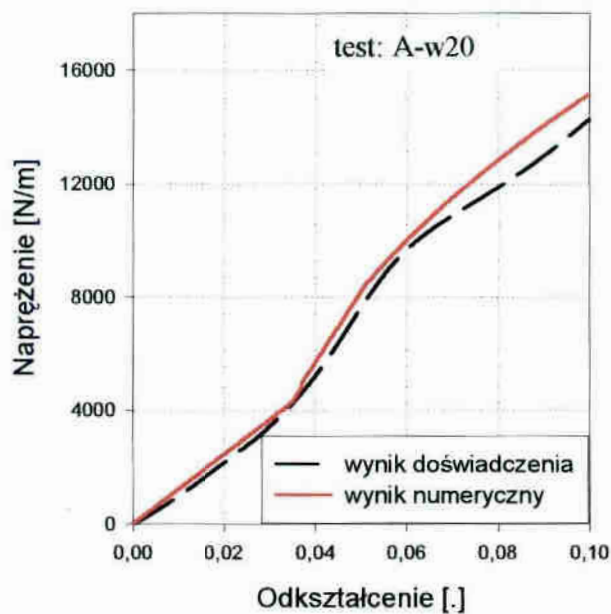
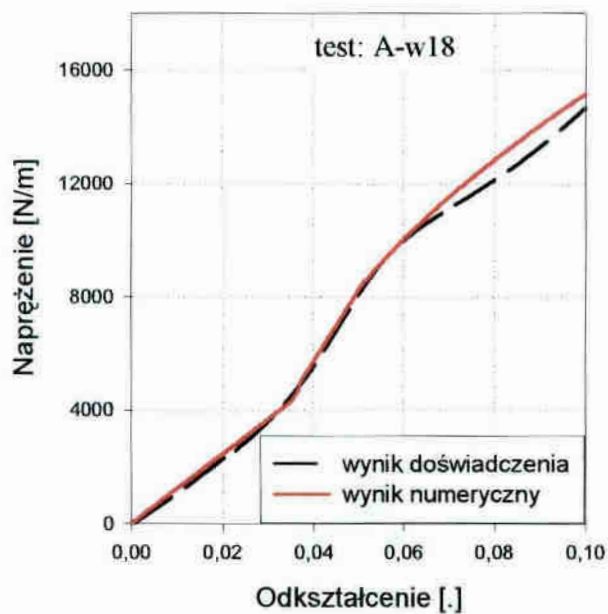
Rys. 6.12. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)



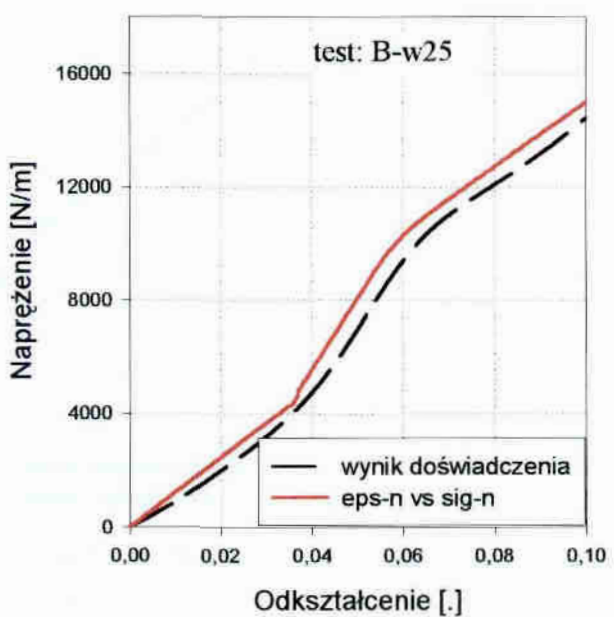
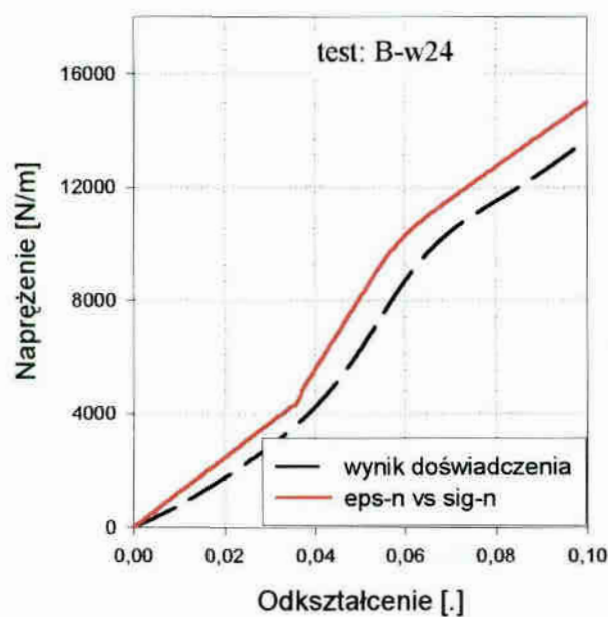
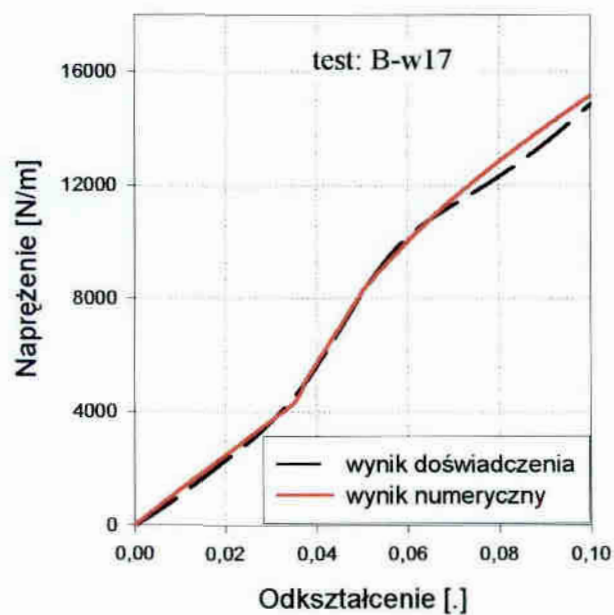
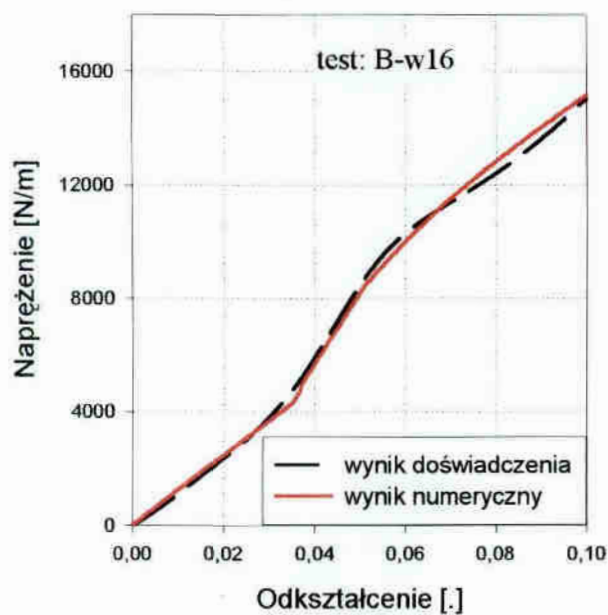
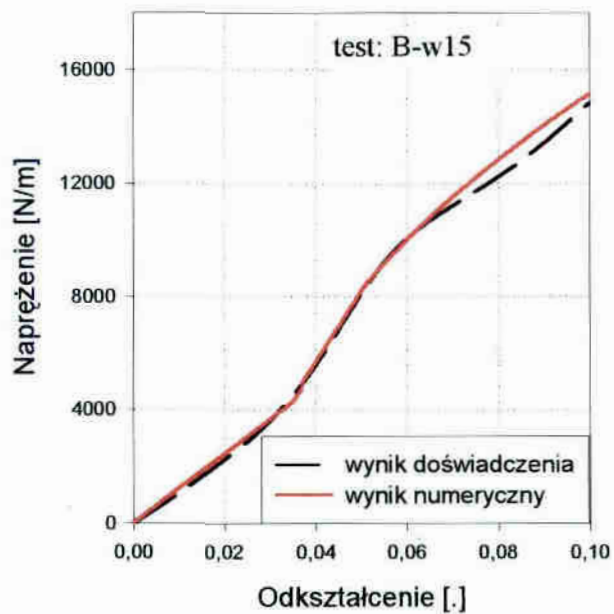
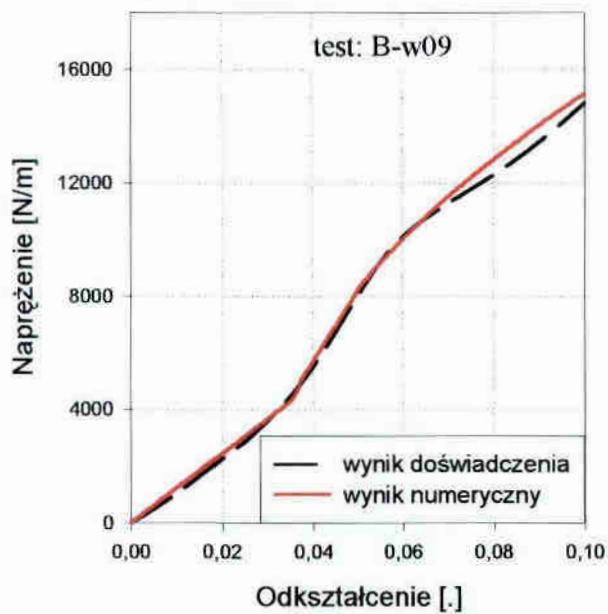
Rys. 6.13. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$)



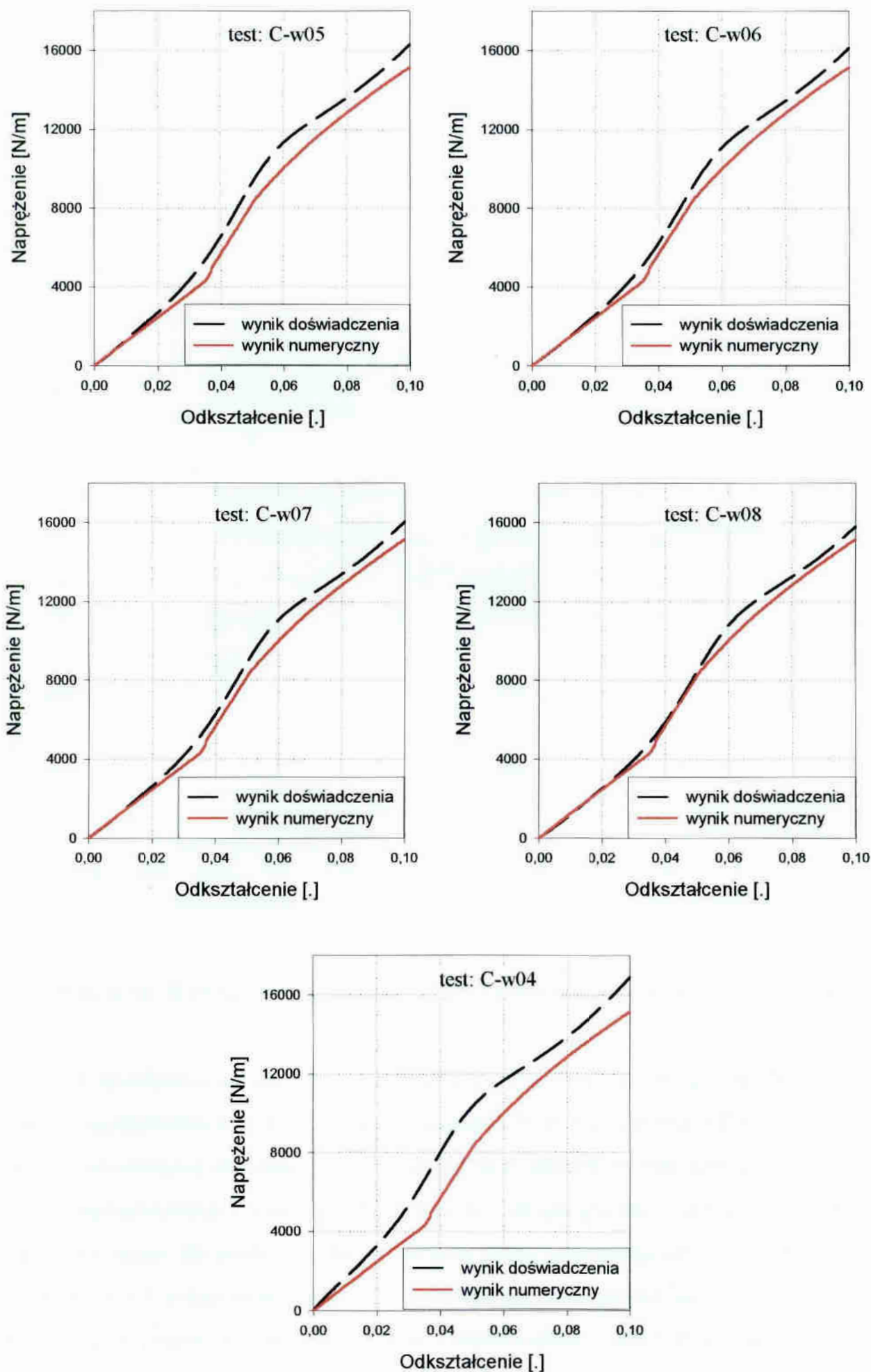
Rys. 6.14. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku osnowy ($\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$)



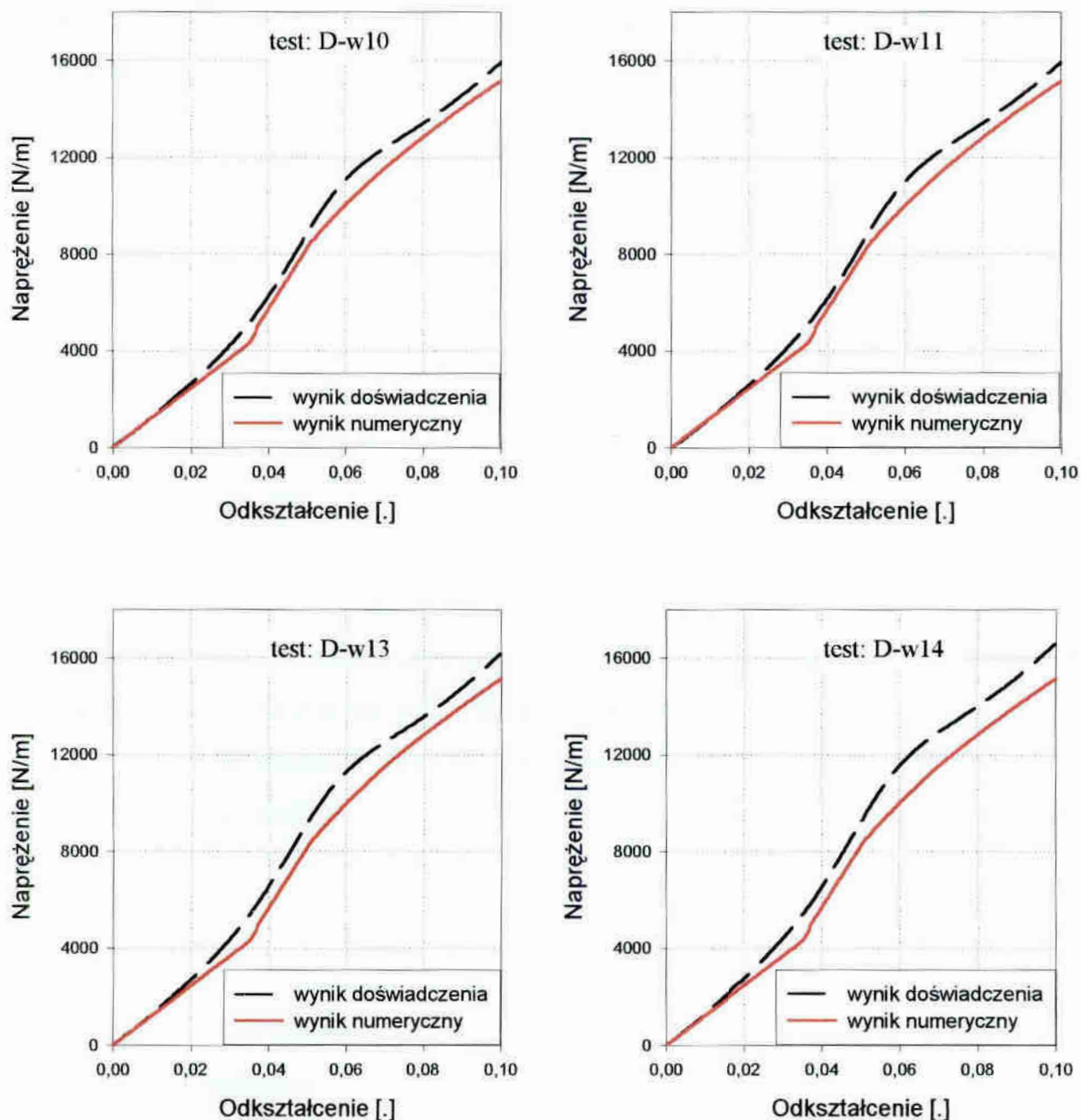
Rys. 6.15. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} s^{-1}$)



Rys. 6.16. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)



Rys. 6.17. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\epsilon} = 10^{-3} s^{-1}$)



Rys. 6.18. Wyniki numerycznej symulacji na kierunku wątku ($\dot{\varepsilon} = 5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$)

Z przedstawionej powyżej weryfikacji wynika, że przeprowadzona identyfikacja stałych materiałowych modeli lepkoplastycznych Bodnera-Partoma i Chaboche'a wykazała zadawalającą zbieżność symulowanych na podstawie wyznaczonych parametrów testów numerycznych z wynikami bezpośrednimi eksperymentu. Należy podkreślić, że wyniki uzyskane dla modelu Bodnera-Partoma lepiej przybliżają charakter prezentowanych krzywych odkształcenie-napężenie. Wiąże się to na pewno bezpośrednio ze sposobem identyfikacji, a przede wszystkim z możliwością rozdzielenia podczas analizy parametrów materiałowych. Natomiast identyfikacja parametrów modelu Chaboche'a

odbywa się jednocześnie dla większości poszukiwanych wartości. Dobra zgodność symulacji dla wątku potwierdza poprawność przyjętych w rozdziale 5.5 założeń dotyczących wątku.

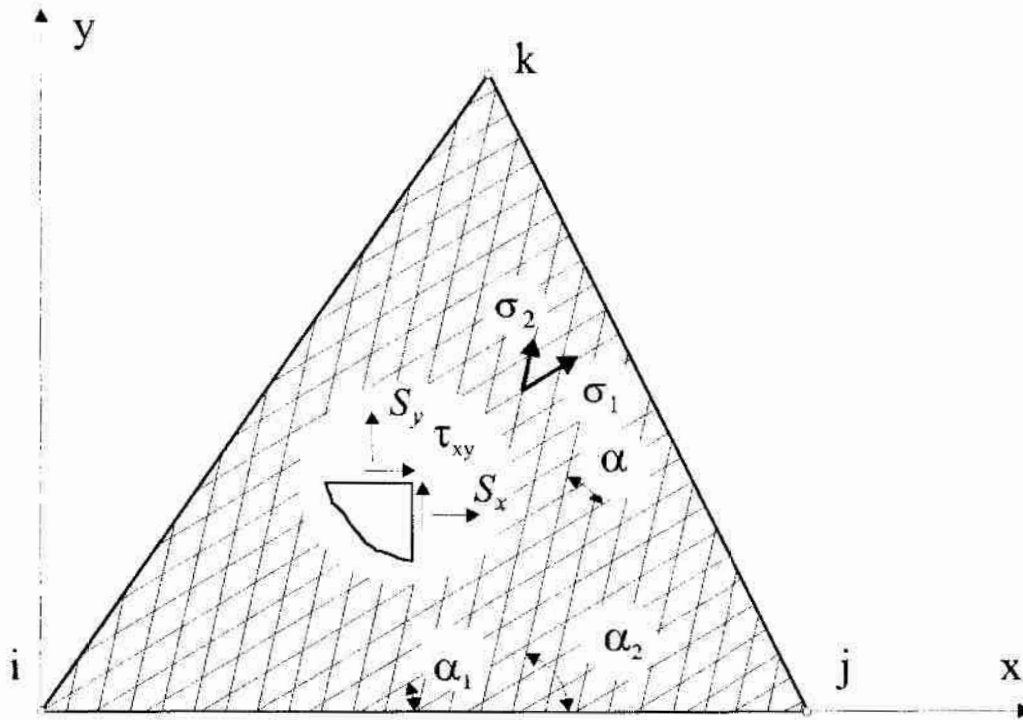
7. Model powłoki tekstylnej

Analiza zadania z materiału tekstylnego wymaga zastosowania odpowiedniego modelu powłoki, materiału, obciążenia oraz metody obliczeń. Podstawą właściwego modelowania są badania doświadczalne. Większość badań przeprowadzana jest w jednoosiowym stanie naprężenia, co pozwala na łatwiejszą analizę wyników. Jednak, aby dokonać obliczeń rzeczywistego zadania, należy przenieść uogólnienia dokonane na podstawie eksperymentów jednokierunkowych na pracę całej powłoki. Należy podkreślić, że w przypadku teorii lepkoplastyczności dodatkowych trudności dostarcza rozpatrywanie równoległe efektów reologicznych i plastycznych. Na podstawie eksperymentu określone są właściwości materiałowe przy stałych prędkościach odkształcenia, natomiast podczas rzeczywistego procesu obciążania prędkość odkształcenia jest zmienna w czasie. Dlatego trudno jest zastosować bezpośrednio wyniki eksperymentalne do opisu matematycznego. Samo kryterium wpływu prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne jest różne dla różnych materiałów. Prędkości odkształcenia rzędu $10^{-5} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, dla metali w temperaturze pokojowej, będą miały niewielki wpływ na właściwości materiałowe, natomiast dla materiałów tekstylnych będzie to właściwy zakres prowadzenia badań. Z teoretycznego punktu widzenia najwłaściwsze byłoby zastosowanie najbardziej ogólnego sformułowania do opisu właściwości materiałowych, uwzględniającego takie efekty jak: wpływ prędkości odkształcenia, anizotropia materiału, wpływ temperatury, różne warunki plastyczności, reguły wzmocnienia oraz mechanizmy zniszczenia. Takie podejście nie jest jednak możliwe do rozwiązania konkretnych problemów technicznych, gdyż barierą staje się liczba stałych materiałowych oraz złożoność modeli konstytutywnych.

Nieuniknione zatem stało się zastosowanie metod przybliżonych (metody numeryczne) do obliczeń problemów mechaniki nieliniowej. Do głównych metod należą: Metoda Różnic Skończonych (MRS), Metoda Elementów Skończonych (MES) oraz Metoda Elementów Brzegowych (MEB).

Jedną z możliwości obliczenia powłoki z materiału tekstylnego jest zastosowanie modelu sieci gęstej w metodzie elementów skończonych. Dyskretny model siatki ciągnowej uzyskuje się poprzez zastąpienie nici wątku i osnowy układem cięgien pracującym w płaskim stanie naprężenia. Opis elementu skończonego z modelem sieci gęstej dla tkaniny tekstylnej można znaleźć w publikacjach [12], [33]. Autorzy tych prac zakładają, że analizowane przekrycie tekstylne jest dyskretyzowane siatką trójwę-

złowych elementów skończonych (rys. 7.1) i obliczane jest w płaskim stanie naprężenia.



Rys. 7.1. Element skończony w modelu sieci gęstej

W elemencie takim rozróżniono dwie rodziny nici, wążek i osnowa. Nici te tworzą odpowiednio kąty α_1 i α_2 z osią x przyjętego lokalnego układu współrzędnych. Założono również, że podczas deformacji lokalny układ współrzędnych elementu będzie dobierany tak, że kąt α_1 jest stały, natomiast kąt α_2 może się zmieniać. Można się też posłużyć kątem wzajemnym między oboma rodzinami $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$, który jest również zmienny. Składowe odkształcenia nici $\{\varepsilon\}$ mogą być wtedy obliczane ze składowych odkształceń $\{\xi\}$ dla płaskiego stanu naprężenia

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_1 & \sin^2 \alpha_1 & \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ \cos^2 \alpha_2 & \sin^2 \alpha_2 & \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\Omega] \{\xi\} \quad (7.1)$$

Ponieważ założono, że naprężenia w niciach zależą tylko od wydłużeń w ich kierunkach, to relacje pomiędzy odkształceniami nici $\{\varepsilon\}$, a naprężeniami w niciach $\{\sigma\}$, dają się rozdzielić i zapisać jak w stanie jednoosiowym dla każdej rodziny nici:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(\varepsilon_{11}) \\ F_2(\varepsilon_{22}) \end{Bmatrix} \quad (7.2)$$

Funkcje F_1 i F_2 opisują zastosowany wariant równań sprężystych i określone są na podstawie prób rozciągania wątku i osnowy. W pracy [36] zaproponowano nieliniowy opis równań sprężystych za pomocą funkcji wielomianowej trzeciego rzędu. W publikacji [34] proponuje się bardziej skomplikowane równania sprężyste Muhnagan'a.

Natomiast w publikacji [35] używane są równania lepkosprężyste. W przypadku zastosowania takich oraz lepkoplastycznych modeli praw konstytutywnych (zgodnie z tym, co powiedziano w rozdziale 4) naprężenia w niciach, oblicza się metodą przyrostową

$$\sigma = \sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma \quad (7.3)$$

gdzie:

σ_i, σ_{i-1} - naprężenia w aktualnym i poprzednim przyroście

$\Delta\sigma$ - przyrost naprężenia jako zależna od prawa konstytutywnego funkcja przyrostu odkształceń i naprężeń i odkształceń w poprzednim przyroście

$$\Delta\sigma = \mathcal{F}(\Delta\varepsilon, \varepsilon_{i-1}, \sigma_{i-1}) \quad (7.4)$$

Postać funkcji \mathcal{F} zależy od przyjętego prawa lepkosprężystego lub lepkoplastycznego.

Ostatecznie składowe naprężenia wynikające z płaskiego stanu naprężenia mogą być obliczone na podstawie naprężeń w niciach, zgodnie z równaniem:

$$\{S\} = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_1 & \cos^2 \alpha_2 \\ \sin^2 \alpha_1 & \sin^2 \alpha_2 \\ \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 & \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{Bmatrix} = [\Omega]^T \{\sigma\} \quad (7.5)$$

Dalsze obliczenia kontynuowane są zgodnie z typowym algorytmem metody elementów skończonych dla płaskiego stanu naprężenia [61].

8. Wnioski i uwagi końcowe

Niniejsza rozprawa prezentuje analizę i problemy identyfikacji parametrów materiałowych dla dwóch wybranych modeli lepkoplastycznych równań konstytutywnych, Bodnera-Partoma i Chaboche'a.

Przedstawiona w pracy metodyka identyfikacji parametrów materiałowych obu modeli bazuje na przeprowadzonych testach laboratoryjnych jednoosiowego rozciągania ze stałą prędkością odkształcenia. Dodatkowo przeprowadzono wyznaczanie parametrów modelu Chaboche'a na podstawie jednoosiowych prób obciążenia cyklicznego symulowanego numerycznie przy wykorzystaniu znanych parametrów modelu Bodnera-Partoma.

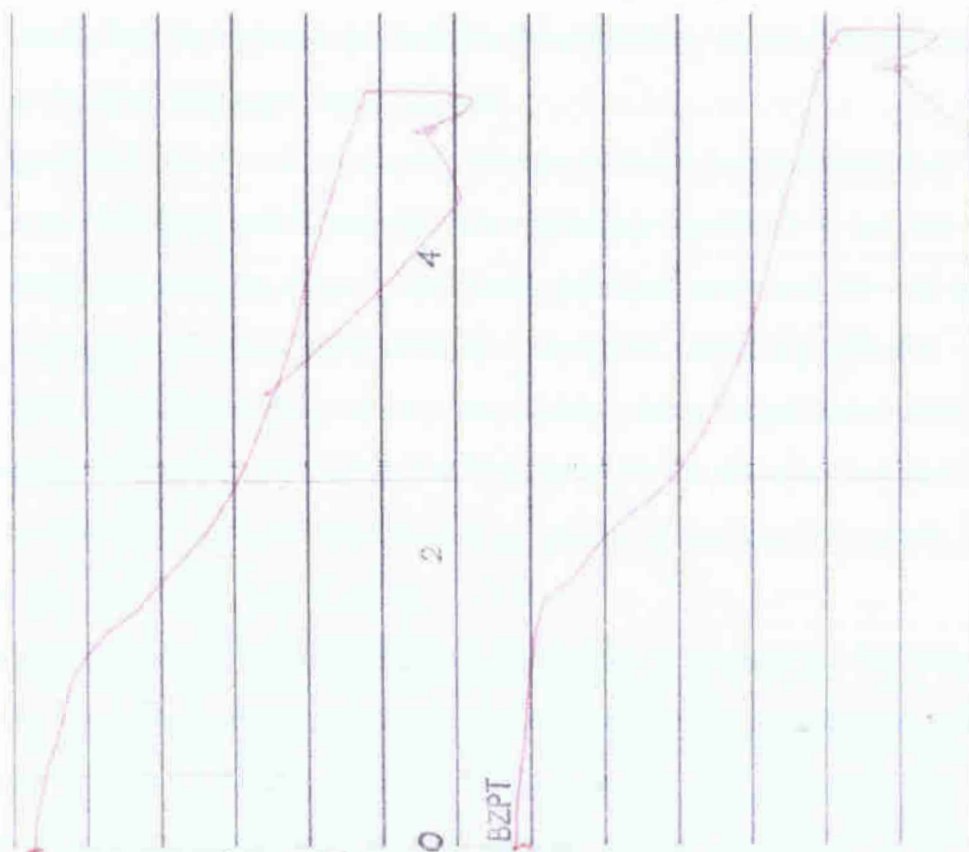
Autor rozprawy uważa, że postawiona na początku teza: *Możliwe jest zastosowanie modeli zbudowanych dla lepkoplastycznych związków konstytutywnych, typowych dla metali, do opisu nieliniowych właściwości materiałowych powlekaney tkaniny tekstylnej*, została w pracy dowiedziona.

W trakcie prowadzonych badań i identyfikacji zwrócono uwagę na szereg aspektów mogących znacząco wpływać na jakość uzyskanych wyników. Najważniejsze z nich podano poniżej.

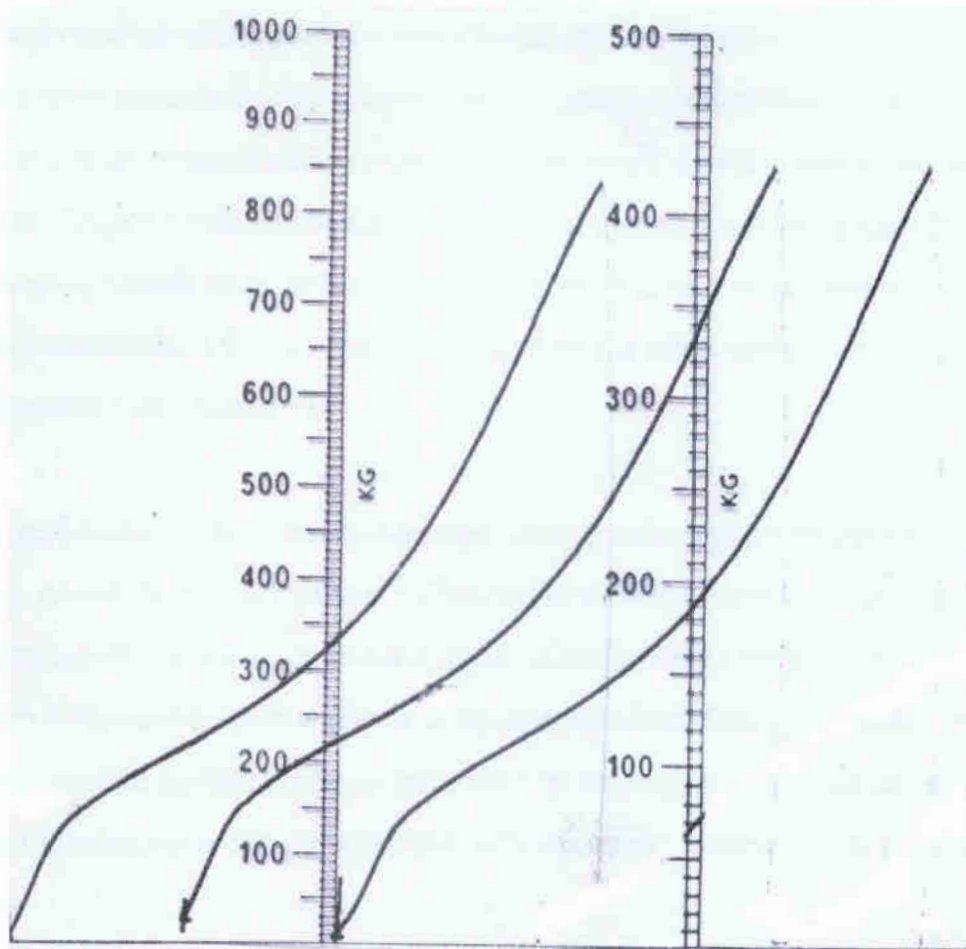
Podczas prowadzenia badań laboratoryjnych istotne jest uwzględnienie wszystkich parametrów mających bezpośredni wpływ na jakość uzyskiwanych wyników, wśród których najbardziej znaczące to: warunki klimatyczne podczas eksperymentu jak i aklimatyzowanie próbek, długość zakleszczenia i wymiary próbki oraz prędkość rozciągania próbki. Jednak, by móc oszacować wpływ powyższych parametrów, lub by ten wpływ wyeliminować, należy dysponować aparaturą badawczą najwyższej klasy. Ponieważ dopiero pomiar z najwyższą możliwą dokładnością pozwala na uwzględnienie innych parametrów mogących mieć wpływ na uzyskiwane wyniki badań.

Przed przystąpieniem do zasadniczych badań prezentowanych w niniejszej pracy przetestowano kilka maszyn wytrzymałościowych pod kątem jakości uzyskiwanych na nich wyników. Otrzymane rezultaty w postaci wykresów przemieszczenie – obciążenie ilustrują rys.8.1 i 8.2. Jakość uzyskanych wyników na tych maszynach wytrzymałościowych zależała głównie od jakości urządzenia rejestrującego w postaci pisaka. Natomiast odczyt uzyskanych wartości na wykresie możliwy był tylko przy pomocy linijki. Nie było też możliwości rejestracji funkcji w czasie. Zastosowanie tego typu maszyn

wytrzymałościowych do badań mających umożliwić identyfikację niesprężystych parametrów materiałowych jakiegokolwiek modelu reologicznego nie jest możliwe.



Rys.8.1. Wynik badań na maszynie wytrzymałościowej RT-250M-2



Rys.8.2. Wynik badań na maszynie wytrzymałościowej Monsanto Tensometer

Mając powyższe na uwadze można wyciągnąć następujące wnioski na temat przeprowadzonych eksperymentów:

1. Prowadzenie badań wymaga posiadania laboratorium wytrzymałościowego, wyposażonego w aparaturę najwyższej jakości.
2. Wymagane jest stosowanie maszyn wytrzymałościowych sterowanych komputerowo oraz umożliwiających komputerową rejestrację wyników w postaci wartości siły, przemieszczenia oraz czasu. Sterowanie maszyny musi umożliwiać prowadzenie badań ze stałą prędkością odkształcenia w szerokim zakresie prędkości.
3. Ciekawym materiałem porównawczym byłoby także uzyskanie wyników badań dwuosiowych, jednak ze względu na brak dostępu do maszyny wytrzymałościowej umożliwiającej rejestrację takich badań w czasie, eksperymentów tych nie przeprowadzono.
4. Konieczne jest duże doświadczenie i wyczucie problematyki badawczej w celu opracowania właściwej metodyki badań oraz zachowanie bezwzględnie reżimu przeprowadzania próby oraz rejestracji wyników.
5. Należy pamiętać, że sposób przygotowania próbek do badań może mieć duży wpływ na jakość uzyskanych wyników. Kształt i sposób wycięcia próbek może znacząco wpływać na rozrzut właściwości badanego materiału.
6. Podczas prowadzenia badań istotne jest uwzględnienie również innych czynników mogących mieć bezpośredni wpływ na uzyskiwane wyniki takich jak: warunki klimatyczne, długość zakleszczenia, wymiary oraz prędkość rozciągania próbki.
7. Podstawową zasadą przy pobieraniu próbek do badań jest zachowanie jednorodności partii materiału. Dlatego też próbki wycięto wzdłuż (osnowa) i w poprzek (wętek) tej samej rolki materiału.

Na podstawie badań jednoosiowego rozciągania przeprowadzono identyfikację parametrów prawa Bodnera-Partoma i Chaboche'a. W literaturze można znaleźć wiele modeli opisujących zjawiska lepkoplastyczne. Zastosowanie tych praw wymaga jednak poznania ich stałych materiałowych oraz sposobów identyfikacji. Dlatego też zdecydowano się ograniczyć do identyfikacji parametrów najczęściej używanego prawa Bodnera-Partoma i Chaboche'a. Do najważniejszych wniosków dotyczących procesu identyfikacji należą:

1. Identyfikacja bezpośrednia na podstawie przeprowadzonych badań rozciągania próbek jest trudna ze względu na konieczność podania parametrów początkowych

- identyfikowanej funkcji. Zaobserwowano, że wynik końcowy identyfikacji w znacznym stopniu może zależeć od parametrów początkowych (niejednoznaczność identyfikacji).
2. Szczególne trudności napotkano przy identyfikacji parametrów prawa Chaboche'a, przy okazji korzystania jedynie z wyników prób rozciągania, nie jest możliwe rozdzielanie efektów lepkich i funkcji wzmocnień. A zatem większość parametrów tego prawa musi być identyfikowana jednocześnie.
 3. W celu znalezienia parametrów początkowych do identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a wykonano symulację numeryczną prób obciążeń cyklicznych. Wykonanie badań w postaci pełnych cykli obciążenia do uzyskania takiej samej wartości odkształcenia przy rozciąganiu i ściskaniu, ponad wartość odkształcenia powodującego uplastycznienie jest najbardziej efektywną metodą doświadczalną do identyfikacji parametrów modelu Chaboche'a.
 4. Lepkoplastyczne związki konstytutywne budowane są za pomocą równań różniczkowych, a zatem rozwiązanie ich wymaga odpowiedniej metody całkowania numerycznego. To zaś wiąże się z zastosowaniem iteracji w trakcie obliczeń, co wymaga odpowiedniego doboru długości kroku całkowania. Ma to poważny wpływ na stabilność metody identyfikacji oraz problem sumowania się błędów.
 5. Ze względu na brak danych w literaturze, odnośnie wartości parametrów materiałowych wybranych modeli praw konstytutywnych dla materiałów tekstylnych powlekanych, konieczna jest weryfikacja przeprowadzonych obliczeń. Pierwszym testem powinno być porównanie wyników doświadczeń z symulacją numeryczną prób wykonaną na podstawie zidentyfikowanych parametrów.

Niniejsza praca stanowi jedynie wstęp do analizy powłokowych przekryć wykonanych z materiałów tekstylnych. Podaje przepis, według którego może przebiegać identyfikacja parametrów materiałowych. Zidentyfikowane parametry rozpatrywanych modeli lepkoelastycznych powinny jeszcze zostać zweryfikowane przez obliczenia dla rzeczywistej powłoki. Przeprowadzenie jednak takich obliczeń wiąże się z wykonaniem stanowiska badawczego – modelu przekrycia. Zadanie to jest na tyle złożone, że zrealizowanie go może stanowić dalszy etap analizy przekrycia z materiału tekstylnego i kontynuowanie przez autora niniejszej rozprawy tematyki identyfikacji parametrów materiałowych przy zastosowaniu różnych modeli materiałowych.

9. Załączniki

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń i identyfikacji zgromadzono obszerną bibliotekę załączników. Ze względu na znaczną ilość i objętość tych załączników, zdecydowano się na ich zapis na płycie CDR. Zbiory posegregowano w kartotekach zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 9.1.



Rys. 9.1. Schemat płyty CDR - Załączniki

Kartoteki *Badania reologiczne* i *Badania dorażne* zawierają pliki tekstowe, otrzymane bezpośrednio w wyniku rejestracji komputerowej podczas prowadzonych badań.

Kartoteka *Identyfikacja* zawiera odpowiednio posegregowane pliki otrzymane podczas obróbki wymienionych wcześniej plików tekstowych. Pliki tej kartoteki zapisane są w formacie *.JNB programu SIGMAPLOT 2000, wersja 6.0. Właścicielem licencji wspomnianego programu o numerze seryjnym 7289078 jest Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej, a użytkownikiem dr hab. inż. Paweł Kłosowski.

Summary

Laboratory Tests and Identification of Inelastic Properties of Coated Fabric „Panama”.

The work deals with applications analysis of viscoplastic constitutive models to the description of the coated textile fabric PANAMA materials' properties. In the work the schedule of laboratory tests necessary for development of these parameters is proposed. The parameters have been identified for two viscoplastic models: the Chaboche and Bodner-Partom model. The results of these identifications have been verified by the comparison of laboratory data with the results of tests' numerical simulation. The differences between results of the both models' identifications have been analyzed.

Zusammenfassung

Laborprüfungen und Identifizierung unelastischer Eigenschaften des beschichteten Textilgewebes vom Typ „Panama”.

Gegenstand der Arbeit ist der Versuch, viskoplastische konstitutive Modelle zur Beschreibung der werkstofflichen Eigenschaften des beschichteten Gewebes PANAMA anzuwenden. In der Arbeit ist ein Programm notwendiger Laborversuche für die Bestimmung dieser Größen festgelegt worden. Die Kenngrößen zweier viskoplastischer konstitutiver Modelle wurden identifiziert: die von Chaboche und die von Bodner-Partom. Die berechneten Kenngrößen wurden durch Vergleich zwischen den Laborergebnissen und den Ergebnissen der numerischen Simulation verifiziert. Ferner wurde auf die Differenz zwischen den Ergebnissen der Identifizierung beider Modelle und den Versuchen hingewiesen.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Abaqus version 6.2 - Theory Manual.*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, 2001.
- [2] Abdel-Kader M.S., Eleiche A.M.: *Evaluation of parameters of a modified Chaboche theory with application to Inconel 718*. Proc. MECAMAT, Becauçon 1988, 519-535.
- [3] Adamczyk R., Cichocki K., Ruchwa M.: *Material modelling for strictures subjected to impulsive loading*. Computer Assisted Mechanics & Engineering Sciences, Kleiber M. (ed), PAN, No 6, 1999, 231-244.
- [4] Amar G., Dufailly J.: *Identification and Validation of Viscoplastic and Damage Constitutive Equations*. Europ. Jour. of Mech. A/Solids, **12**, 2, 1993, 197-218.
- [5] Bäckmann R.: *Lichttextilien für Lichtsegel und Lichtmembranen*. Bauen mit Textilien, Ernst&Sohn, Heft 4, 2000, 7-11.
- [6] Ben-Cheick A.: *Elastoviscoplasticité à température variable*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1987.
- [7] Berger H.: *Light Structures - Structures of Light*. Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel, 1996.
- [8] Bodner S. R., Partom Y.: *Constitutive Equations for Elastic-Viscoplastic Strain-Hardening Materials*. Trans. ASME, J. Appl. Mech., **42**, 1975, 385-389.
- [9] Bodner S. R.: *Review of a Unified Elastic-Viscoplastic Theory*, in *Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity*. Ed. K. Miller, Elsevier Appl. Sci., 1987, 273-301.
- [10] Bodner S. R.: *Unified Plasticity – an Engineering Approach*. Final Report, Faculty of Mechanical Engineering. Technion – Israel Institute of Technology Haifa , October 2000.
- [11] Boruszak A., Sygulski R., Wrześniewski K.: *Wytrzymałość materiałów. Doświadczalne metody badań*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Poznań, 1984.
- [12] Branicki Cz.: *Niektóre zagadnienia statyki siatek ciągnowych*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1969.
- [13] Campbell J.D.: *Dynamic Plasticity of Metals*, Springer Verlag, New York, 1970.
- [14] Chaboche J. L.: *Viscoplastic Constitutive Equations for the Description of Cyclic and Anisotropic Behaviour of Metals*. XVII Polska Konferencja Mechaniki Ciała stałego. Szczyrk . Bull. Acad. Pol. Sci., Série Sci.-Techn., **25**, 1977, 33-42.

- [15] Chen Wai-Fah: *Constitutive Equations for Engineering Materials*. Elsevier Science B.V., 1994.
- [16] Cowper G.R., Symonds P.S.: *Strain hardening and strain rate effects in the impact loading cantilever beams*. Brown University, Technical Report No 28, 1957.
- [17] Eftis J., Abdel Kader M.S., Jones D.I.: *Comparisons between the modified Chaboche and Bodner-Partom viscoplastic constitutive theories at high temperature*. Int. J. of Plasticity, Vol. 6, 1989, 1-27.
- [18] Filipkowski J., Jacoszek J., Sienkiewicz Z.: *Konstrukcja i badania powłoki tekstylnej*. Inżynieria i Budownictwo 11/88, 1988, 394-398.
- [19] Filipkowski J., Jacoszek J., Zagubień A.: *Sprawozdanie z realizacji zadania badawczego wchodzącego w skład projektu badawczego NR 7 TO7E 001 10 pt. „Reologia gruntu zbrojonego”*. Raport na zlecenie Instytut Budownictwa Wodnego PAN nr 505.01.08 z dnia 24.03.1997 r., 1997-1998.
- [20] Filipkowski J., Jacoszek J.: *Badanie własności niesprężystych materiałów tekstylnych i sformułowanie równań konstytutywnych w celu obliczania przekryć tekstylnych współpracujących ze stalową konstrukcją nośną*. Sprawozdanie syntetyczne z badań prowadzonych w 1984 roku, zlecenie 501.01.151 Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej IV Wydział PAN, Warszawa, 1984.
- [21] Filipkowski J., Jacoszek J.: *O właściwościach mechanicznych materiałów tekstylnych stosowanych w przekryciach powłokowych*. IV Konferencja „Konstrukcje powłokowe teoria i zastosowanie”, Wrocław, 1986.
- [22] Filipkowski J., Jacoszek J.: *Właściwości mechaniczne powlekanych materiałów tekstylnych*. Archiwum Inżynierii Lądowej – tom XXXIV 2/1988, 243-259.
- [23] Fung Y.C.: *Podstawy mechaniki ciała stałego*., PWN, Warszawa, 1974.
- [24] Greiner-Mai D.: *Bauen mit Textilien – Membrantragwerke*. Bautechnik Heft 2, Februar 1998, Ernst&Sohn, 112-115.
- [25] Hopkins H.G.: *Dynamic inelastic deformation of metals*. Applied Mechanics Reviews, Vol. 14, No 6, 1961, 417-431.
- [26] Houtman R., Orpara. M.: *Materials for membrane structures*. Bauen mit Textilien, Heft 4, Ernst&Sohn, 2000, 27-33.
- [27] Huang S., Khan A. S.: *Modeling the Mechanical Behavior of 1100-0 Aluminum at Different Strain Rates by the Bodner-Partom Model*. Int. J. of Plasticity, Vol. 8, 1992, 501-512.

- [28] Johnson G.R., Cook W.H.: *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*. Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983, 541-548.
- [29] Johnson W.: *Impact Strength of Materials*. Edward Arnold, London, 1972.
- [30] Kąkol W., Łodygowski T.: *Introduction to ABAQUS*. Comp. Meth. in Civil Eng., 3, 1993, 67-82.
- [31] Kłosowski P., Woźnica K.: *Comparative Analysis of Dynamic Behaviour of an Elasto-Viscoplastic Truss Element*. Machine Dynamics Problems, 2000, Vol. 24, No. 3, 33-53.
- [32] Kłosowski P.: *Nieliniowa analiza numeryczna i badania doświadczalne drgań sprężysto-lepkoplastycznych płyt i powłok*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Monografie 8, Gdańsk, 1999.
- [33] Kłosowski P.: *Numerical Problems of Calculations of Hanging Roofs*. Proc. Int. Conf. On Lightweight Structures in Civil Engineering, Warszawa 25-29 September 1995, Vol. 1, 661-669.
- [34] Kłosowski P.: *Obliczenia statyczne pewnego przekrycia wiszącego z tkaniny technicznej o cechach materiału Murnaghana*. VII Konferencja Metody Komputerowe w Mechanice, Gdynia 1985, Vol. 2, 394-402.
- [35] Kłosowski P.: *Problemy pelzania przekryć wiszących z tkanin technicznych*. Wrocław 1987, Pr. Nauk. Inst. Inż. Łąd. P. Wroc. 38, Konferencje nr 14, 43-48.
- [36] Kłosowski P.: *Statyka i dynamika przekryć membranowo – ciągnowych w zakresie fizycznie i geometrycznie nieliniowym*. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 1983.
- [37] Krummheuer W.: *Mechanical Properties of PCV – Coated Fabrics and their Joints*. Journal of Coated Fabrics, 8, 1979, Tłumaczenie na rosyjski: *Свойства тканей с покрытием из ПВХ, применяемых в пневматических конструкциях*. Пневматические строительные конструкции, Москва 1983, 224-238.
- [38] Lemaitre J., Chaboche J. L.: *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [39] Lush A. M., Weber G., Anand L.: *An Implicit Time-Integration Procedure for a Set of Internal Variables Constitutive Equations for Isotropic Elasto-Viscoplasticity*. Int. J. of Plasticity, Vol. 5, 1989, 521-549.
- [40] Marquardt D.W.: *An algorithm for least square estimation of parameters*. Indust. Math., 11/1963, 431-441.

- [41] Meffert B.: *Mechanische Eigenschaften PCV – beschichteter Polyestergewebe*. Dissertation, Achen, 1978.
- [42] Oktaba W.: *Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1980.
- [43] Perzyna P.: *Teoria lepkoplastyczności*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1966.
- [44] Perzyna P.: *Termodynamika materiałów niesprężystych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1978.
- [45] PN-75/C-89058: *Tkaniny powlekane plastyfikowalnym polichlorkiem winylu. Metodyka badań*.
- [46] PN-93/P-04968: *Wyroby włókiennicze powleczone gumą lub tworzywami sztucznymi. Wyznaczanie siły zrywającej i wydłużenia przy zerwaniu*.
- [47] Rajendran A.M., Batra R.C., (eds.): *Constitutive Laws: Theory, Experiments and Numerical Implementation*. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, 1995.
- [48] Reinhardt H-W.: *Zweiachsige Prüfung und Festigkeit von textilen Baustoffen*. Die Bautechnik 4/1976, 138-141.
- [49] Rowley M.A., Thornton E.A.: *Constitutive modelling of the visco-plastic response hastelloy-X and aluminium alloy 8009*. J. Eng. Mat. Tech. **118**, 1/1996, 9-27.
- [50] Rymarz Cz.: *Mechanika ośrodków ciągłych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993.
- [51] Sawicki A.: *Mechanika kontinuum – Wprowadzenie*. IBW PAN, Gdańsk, 1994.
- [52] Schweinar R.: *Alles mit einem Dach*. Bauingenieur Band 71, Heft 4, April 1996, Springer, 1996, A13-A14.
- [53] *SigmaPlot 2000 Programming Guide*. SPSS Inc., Chicago, 2000.
- [54] Sobczyk M.: *Statystyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [55] Szczepański W.: *Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*. Mechanika Techniczna, t. X., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1984.
- [56] Taylor J.R.: *Wstęp do analizy błędów pomiarowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
- [57] *Włókiennictwo. Poradnik Inżyniera*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.

-
- [58] Woźnica K., Kłosowski P.: *Evaluation of viscoplastic parameters and its application for dynamic behaviour of plates*. Archive of Applied Mechanics **70**, 2000, 561-570.
- [59] Woźnica K.: *Dynamique des structures elasto-viscoplastique*. Memoire d'habilitation a diriger des recherches. Lille: Université Des Sciences et Technologies de Lille 1997.
- [60] Woźnica K.: *Lois de comportement du solide elasto-viscoplastique*. Cahiers de Mécanique **2/93**, Univ. de Sciences et Techn. Lille, EUDIL-LML.
- [61] Zienkiewicz O.C.: *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1972.

Podziękowania

Autor pracy składa podziękowania promotorowi, dr. hab. inż. Pawłowi Kłosowskiemu z Katedry Mechaniki Budowli Politechniki Gdańskiej, za pomoc w realizacji pracy oraz cenne uwagi, które istotnie wpłynęły na ostateczną formę rozprawy.

Dziękuję również prof. dr. inż. Janowi Filipkowskiemu za ukierunkowanie tematyczne i uwagi praktyczne dotyczące prowadzonych przeze mnie badań eksperymentalnych.

Chciałbym również podziękować kierownikowi Katedry Mechaniki Budowli, profesorowi Politechniki Koszalińskiej, dr. hab. inż. Zbigniewowi Sienkiewiczowi, za stworzenie mi warunków do szybkiego zakończenia i napisania rozprawy, oraz pani dr inż. Joannie Jacoszek, za uwagi merytoryczne w trakcie prowadzonych przeze mnie badań.