

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Andrzej KATUNIN

**Ocena trwałości
zmęczeniowej
laminatów
polimerowych
w stanie
lepkosprężystym
z uwzględnieniem
zjawisk cieplnych**

Gliwice 2012

Recenzenci

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski, Politechnika Warszawska

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński, Politechnika Śląska

Redaktor zeszytów

Wojciech Cholewa

Redaktor techniczny

Marek Wyleźół

Projekt okładki

Wojciech Cholewa, Marek Wyleźół

BibTeX

```
@BOOK{, title = {Ocena trwałości zmęczeniowej laminatów polimerowych  
w stanie lepkosprężystym z uwzględnieniem zjawisk cieplnych}, publisher =  
{Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn}, year  
= {2012}, author = {Katunin, A.}, volume = {146}, series =  
{Zeszyty}, address = {Gliwice}}
```

Znaczące fragmenty pracy zrealizowano w ramach projektu badawczego własnego
N N504 282137 finansowanego przez MNiSW.

ISBN 978-83-60759-21-9

Wydawca

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

tel. (32) 237-14-67, fax (32) 237-13-60

<http://kpk.m.polsl.pl>

Od autora

Zeszyt został opracowany na podstawie rozprawy doktorskiej, którą wykonałem pod kierunkiem prof. dra hab. Wojciecha Moczulskiego. Publiczna obrona rozprawy odbyła się 21. maja 2012 roku przed Komisją Mechaniki powołaną przez Radę Wydziału Mechanicznego Technologicznego. Znaczące fragmenty pracy zrealizowano w ramach projektu badawczego własnego N N504 282137 finansowanego przez MNiSW. Kierownikiem projektu jest promotor rozprawy.

Składam serdeczne podziękowania recenzentom rozprawy doktorskiej, prof. dr. hab. inż. Zbigniewowi Dąbrowskiemu oraz prof. dr. hab. inż. Tadeuszowi Burczyńskiemu za cenne uwagi, które starałem się uwzględnić w niniejszym zeszycie.

Pragnę wyrazić swoją wdzięczność mojemu promotorowi prof. Wojciechowi Moczulskiemu nie tylko za cenne wskazówki, inspirację i wsparcie podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej, ale również za intensywną i wszechstronną opiekę naukową podczas studiów magisterskich i w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej. Składam serdeczne podziękowania Koleżankom i Kolegom z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej za okazaną mi pomoc i życzliwość w czasie wykonywania pracy.

Niniejszą książkę dedykuję moim rodzicom oraz moim przyjaciołom, dziękując za ich wsparcie i wyrozumiałość.

Gliwice, lipiec 2012

Andrzej Katunin

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
Lista skrótów	13
Rozdział 1. Wstęp	15
Rozdział 2. Przegląd i ocena istniejącego stanu wiedzy	21
2.1. Budowa i właściwości zbrojonych laminatów polimerowych	21
2.1.1. Materiały do produkcji laminatów	21
2.1.2. Sposoby wytwarzania laminatów i postacie zbrojenia	22
2.2. Mechanika laminatów polimerowych	23
2.2.1. Związki konstytutywne warstwy ortotropowej	23
2.2.2. Klasyczna teoria laminacji	24
2.2.3. Właściwości cieplne laminatów	26
2.3. Modele stosowane do opisu zachowania laminatów polimerowych.	27
2.3.1. Modele klasyczne	27
2.3.2. Klasyczne modele reologiczne	28
2.3.3. Uogólnione modele reologiczne	30
2.3.4. Nieklasyczne modele reologiczne	32
2.4. Dyssypacja energii mechanicznej w laminatach polimerowych	33
2.4.1. Warunki inicjacji procesów dyssypacyjnych i efekt samorozgrzania .	34
2.4.2. Badania teoretyczne i eksperymentalne dotyczące efektu samo- rozgrzania w polimerach	36
2.5. Modele zmęczeniowe laminatów polimerowych	38
2.5.1. Modele oparte na redukcji sztywności	39
2.5.2. Modele oparte na kumulacji uszkodzeń	40
2.5.3. Modele oparte na funkcji zniszczenia	41
2.5.4. Modele uwzględniające lepkość i efekty cieplne	42
2.6. Występowanie zmęczenia z efektem samorozgrzania w praktyce inżynier- skiej	43
2.7. Podsumowanie	44
Rozdział 3. Problem badawczy	47
3.1. Identyfikacja problemu badawczego	47

3.2. Cel rozprawy	47
3.3. Tezy rozprawy	48
Rozdział 4. Modele teoretyczne opisujące efekt samorozgrzania	49
4.1. Podstawy teoretyczne i założenia wstępne	49
4.2. Efekt samorozgrzania w belce obciążonej cyklicznie	51
4.3. Efekt samorozgrzania w płycie obciążonej cyklicznie	52
4.4. Efekt samorozgrzania w płycie przy drganiach rezonansowych	55
4.5. Podsumowanie	57
Rozdział 5. Relacje termokinetyczne i charakterystyki dynamiczne laminatu	59
5.1. Podstawy teoretyczne	59
5.2. Przygotowanie i realizacja eksperymentów	61
5.2.1. Przygotowanie próbek	62
5.2.2. Statyczne testy weryfikacyjne	62
5.2.3. Parametry eksperymentu DMA	65
5.3. Analiza wyników eksperymentalnych	65
5.3.1. Wyznaczenie energii aktywacji	65
5.3.2. Wyznaczenie współczynników przesunięcia poziomego i konstruowanie krzywych wiodących	69
5.3.3. Porównanie krzywych wiodących uzyskanych metodami symulacyjnymi i eksperymentalnymi	71
5.4. Podsumowanie	72
Rozdział 6. Eksperymentalna ocena zachowania dynamicznego laminatu	75
6.1. Zagadnienia podstawowe	75
6.2. Przygotowanie i realizacja eksperymentów	76
6.2.1. Przygotowanie próbek i aparatury badawczej	76
6.2.2. Realizacja eksperymentów	78
6.3. Opracowanie i analiza wyników eksperymentu	79
6.3.1. Analiza zmian siły wymuszenia	79
6.3.2. Analiza zmian temperatury samorozgrzania	84
6.4. Porównanie wyników teoretycznych i eksperymentalnych efektu samorozgrzania	90
6.5. Podsumowanie	91
Rozdział 7. Ocena zmęczenia laminatów polimerowych	93
7.1. Wstępna koncepcja modelu zmęczeniowego	93
7.2. Eksperymentalna ocena zmęczenia laminatów polimerowych	95
7.2.1. Przygotowanie i realizacja eksperymentów zmęczeniowych	95
7.2.2. Określenie faz zmęczenia	97
7.2.3. Analiza profili i rozkładów temperatury	98

7.2.4. Analiza parametryczna zmienności historii obciążeń i pętli histe- rezy	100
7.2.5. Analiza parametryczna zmienności temperatury	101
7.2.6. Wyznaczenie temperatur krytycznych	103
7.3. Modele zmęczenia laminatów z uwzględnieniem efektu samorozgrzania ...	104
7.3.1. Empiryczny model zmęczenia	105
7.3.2. Model teoretyczno-empiryczny zmęczenia i algorytm wyznaczania cyklu życia laminatu	105
7.3.3. Porównanie wyników eksperymentalnych z modelem teoretyczno- empirycznym	108
7.4. Podsumowanie	109
Rozdział 8. Podsumowanie i wnioski	111
8.1. Wnioski ogólne	111
8.2. Wnioski szczegółowe	112
8.3. Kierunki dalszych badań	113
Bibliografia	130
Streszczenie	131
Summary	132
Резюме	133