

**POLITECHNIKA WROCLAWSKA
INSTYTUT BUDOWNICTWA**

**ANALIZA PRACY STATYCZNEJ ZGINANYCH
BELEK DREWNIANYCH WZMACNIANYCH
PRZY UŻYCIU CFRP**

Raport serii PRE nr 4/07

Tomasz Nowak

Praca doktorska

Promotor:
dr hab. inż. Jerzy Jasieńko, prof. PWr

Słowa kluczowe:
wzmacnianie, konstrukcje drewniane, połączenia klejowe,
CFRP, obiekty zabytkowe, rehabilitacja, konserwacja

Wrocław, 2007

DZIĘKUJĘ WSZYSTKIM, KTÓRZY PRZYCZYNILI SIĘ
DO POWSTANIA TEJ PRACY, A W SZCZEGÓLNOŚCI:
PROFESOROWI JERZEMU JASIEŃKO,
DOKTOROWI DARIUSZOWI CZEPIŻAKOWI,
DOKTOROWI LUDOMIROWI JANKOWSKIEMU,
DOKTOROWI PIOTROWI RAPPOWI
ORAZ FIRMIE S&P ZA PRZEKAZANE MATERIAŁY DO BADAŃ

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	5
1. Wprowadzenie	8
2. Cel, zakres i tezy pracy	10
2.1. Cel pracy	10
2.2. Zakres pracy	10
2.3. Tezy pracy	10
3. Analiza literatury przedmiotu.....	12
3.1. Diagnostyka stanu technicznego konstrukcji drewnianych.....	12
3.2. Przyczyny wykonywania wzmocnień konstrukcji drewnianych.....	16
3.3. Metody wzmocniania i naprawy elementów konstrukcji drewnianych.....	18
3.4. Materiały kompozytowe	22
3.4.1. Podstawowe informacje o materiałach kompozytowych	22
3.4.2. Kompozyty zbrojone włóknami	23
3.4.3. Rodzaje i własności włókien	24
3.4.4. Typy i własności osnów	25
3.5. Badania laboratoryjne elementów wzmocnionych przy użyciu FRP.....	26
3.6. Wybrane przykłady zastosowań materiałów FRP do wzmocniania konstrukcji drewnianych	35
3.7. Modele szacowania nośności belek drewnianych wzmocnionych przy użyciu FRP.....	41
3.7.1. Model obliczeniowy według prawa zachowania płaskich przekrojów	41
3.7.2. Model obliczeniowy według metody zastępczych charakterystyk przekroju ...	42
3.7.3. Model obliczeniowy według metody równości ugięć	44
3.7.4. Modele obliczeniowe odtworzenia strefy rozciąganej	45
3.7.5. Model obliczeniowy wg norm amerykańskich.....	48
3.7.6. Model obliczeniowy wzmocnienia wg. włoskiej instrukcji CNR.....	50
3.7.7. Model obliczeniowy wzmocnienia według C. Malinowskiego.	54
3.7.8. Model obliczeniowy belek zbrojonych kompozytem wg J. Niczyjego.....	56
3.8. Modele zakotwienia klejowego wkładek wzmocniających.....	57
3.8.1. Model zaproponowany przez T.C. Triantofillou	57
3.8.2. Model zaproponowany przez K. Bergmeistera i W. Luggina	60
3.8.3. Model zaproponowany przez J. Jasińko	64
4. Badania własne	66
4.1. Badania pilotażowe.....	66
4.1.1. Cel i program badań pilotażowych.....	66
4.1.2. Wyniki badań pilotażowych	68
4.1.3. Wnioski z przeprowadzonych badań pilotażowych	74
4.2. Badania materiałowe	75
4.2.1. Cel i zakres badań materiałowych.....	75
4.2.2. Badanie drewna	75
4.2.3. Badanie wytrzymałości kleju	83
4.2.4. Badanie taśm CFRP	84
4.2.5. Badanie wytrzymałości połączenia klejowego „taśma CFRP - drewno” na odrywanie.....	85

4.2.6. Badanie wytrzymałości połączenia klejowego „drewno - drewno” na ścinanie przy ściskaniu.....	85
4.3. Badania litych belek drewnianych wzmocnionych przy użyciu CFRP.....	87
4.3.1. Opis badań.....	87
4.3.2. Wyniki badań belek serii A.....	90
4.3.3. Wyniki badań belek serii B.....	93
4.3.4. Wyniki badań belek serii C.....	98
4.3.5. Wyniki badań belek serii D.....	103
4.3.6. Wyniki badań belek serii E.....	108
4.3.7. Wyniki badań belek serii F.....	113
4.3.8. Wyniki badań belek serii G.....	122
4.3.9. Wnioski.....	125
4.4. Elastooptyczne badania wybranych modeli po wzmocnieniu.....	128
4.4.1. Wprowadzenie.....	128
4.4.2. Opis modeli oraz stanowiska badawczego.....	130
4.4.3. Wyniki badań elastooptycznych belki A1.....	130
4.4.4. Wyniki badań elastooptycznych belki B1.....	133
4.4.5. Wyniki badań elastooptycznych belki C1.....	136
4.4.6. Wyniki badań elastooptycznych belki D1.....	138
4.4.7. Wyniki badań elastooptycznych belki F2.....	140
4.4.8. Wnioski ogólne z przeprowadzonych badań elastooptycznych.....	143
5. Model analityczny.....	144
5.1. Przekrój zastępczy belki wzmocnionej.....	144
5.2. Model własny opisujący pracę przekrojów wzmocnionych z identyfikacją nieliniowości belki.....	151
5.2.1. Założenia modelu.....	151
5.2.2. Weryfikacja modelu przeprowadzona dla belki C2.....	158
6. Analiza numeryczna.....	163
6.1. Drewno jako materiał ortotropowy.....	163
6.2. Wytrzymałość materiałów ortotropowych.....	164
6.3. Dane przyjęte do analizy.....	166
6.4. Modelowanie numeryczne metodą elementów skończonych.....	169
6.5. Wyniki analizy numerycznej.....	171
6.6. Wnioski z analizy numerycznej.....	177
7. Podsumowanie.....	178
Literatura.....	179

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

A_d	– powierzchnia przekroju poprzecznego drewna,
A_f	– powierzchnia przekroju poprzecznego zbrojenia FRP,
A_v	– powierzchnia ścinania,
E	– moduł sprężystości,
$E_{0,mean}$, E_d	– moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien,
$E_{t,0,mean}$	– moduł sprężystości drewna przy rozciąganiu wzdłuż włókien,
$E_{c,0,mean}$	– moduł sprężystości drewna przy ściskaniu wzdłuż włókien,
E_k	– moduł sprężystości spoiny klejowej,
E_f	– moduł sprężystości zbrojenia FRP,
E_s	– moduł sprężystości stali,
F	– siła, oddziaływanie,
F_f	– siła rozciągająca w taśmie FRP,
F_n	– siła niszcząca,
G	– moduł sprężystości poprzecznej,
H	– siła rozwarstwiająca,
I_d, I_y	– moment bezwładności przekroju drewnianego,
I_n	– moment bezwładności przekroju nakładek,
I_z	– zastępczy moment bezwładności,
M	– moment zginający,
M_{max}	– maksymalny moment zginający, przeniesiony przez element wzmocniony,
Q	– siła tnąca,
S_f	– moment statyczny wkładki wzmocniającej obliczony względem osi obojętnej przekroju wzmocnionego,
S_y	– moment statyczny odciętej części przekroju,
T	– siła tnąca,
W_d	– wskaźnik wytrzymałości dolny przekroju zastępczego belki,
W_g	– wskaźnik wytrzymałości górny przekroju zastępczego belki,
W_y	– wskaźnik wytrzymałości przekroju drewna,
a	– wysokość strefy ściskanej po wzmocnieniu, odległość siły od podpory,
a'	– wysokość strefy ściskanej przed wzmocnieniem,
b	– szerokość przekroju,
b_f	– szerokość taśmy lub opaski CFRP,
b_z	– zastępcza szerokość drewna,
c	– położenie osi obojętnej po wzmocnieniu względem dolnej krawędzi belki,
$f_{c,0}$	– wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien,
$f_{c,0,d}$	– wytrzymałość obliczeniowa drewna na ściskanie wzdłuż włókien,
$f_{t,0}$	– wytrzymałość drewna na rozciąganie wzdłuż włókien,
$f_{t,0,d}$	– wytrzymałość obliczeniowa drewna na rozciąganie wzdłuż włókien,

$f_{m,d}$	– wytrzymałość obliczeniowa drewna na zginanie,
f_w	– wytrzymałość materiałów CFRP na rozciąganie wzdłuż włókien,
$f_{v,d}$	– wytrzymałość drewna na ścinanie,
$f_{k,d}$	– wytrzymałość kleju na ścinanie,
g	– odległość środka ciężkości zbrojenia rozciąganego od osi obojętnej.
h	– wysokość przekroju,
h_c	– odległość od głównej osi bezwładności do najbardziej oddalonego włókna ściskanego,
h_f	– odległość od głównej osi bezwładności do środka ciężkości zbrojenia,
k_{def}	– współczynnik uwzględniający przyrost przemieszczeń w czasie na skutek pełzania i wpływu wilgoci,
k_{mod}	– współczynnik modyfikujący parametry wytrzymałościowe z uwagi na czas trwania obciążenia i zmiany wilgotności materiału
l	– rozpiętość belki, długość,
l_z	– długość zakotwienia,
n	– iloraz modułu sprężystości zbrojenia (stali lub FRP) do modułu sprężystości drewna wzdłuż włókien,
y	– odległość od głównej osi bezwładności do rozpatrywanego włókna,
s	– obwód przekroju zbrojenia,
t	– czas,
t_f	– grubość taśmy FRP,
t_n	– grubość nakładki drewnianej,
t_k	– grubość kleju,
u	– ugięcie, przemieszczenie,
u_{inst}	– ugięcie doraźne,
u_{fin}	– ugięcie końcowe,
$u_{net,fin}$	– ugięcie dopuszczalne,
q	– obciążenie równomiernie rozłożone,
x	– odległość rozpatrywanego przekroju od początku układu współrzędnych,
x,y,z	– współrzędne kartezjańskie,
z'	– ramię sił wewnętrznych,
α, β	– współczynniki,
ε	– odkształcenie,
ε_s	– odkształcenie stali,
ε_d	– odkształcenie drewna,
σ_c	– naprężenie ściskające,
σ_d	– naprężenie normalne w drewnie,
σ_f	– naprężenie normalne w CFRP,
η	– efekt modyfikacji, iloraz nośności lub sztywności elementu wzmocnionego i nie wzmocnionego,
ν	– współczynnik <i>Poissona</i> ,

μ	– procent lub stopień zbrojenia,
τ	– naprężenie ścinające
τ_d	– naprężenie ścinające w drewnie,
τ_k	– naprężenie ścinające w spoinie,
AFRP	– taśmy z żywicy syntetycznej zbrojone włóknem aramidowym, (z ang. Aramid Fibre Reinforced Polymers),
CFRP	– taśmy z żywicy syntetycznej zbrojone włóknem węglowym, (z ang. Carbon Fibre Reinforced Polymers),
FRP	– taśmy lub pręty z żywicy syntetycznej zbrojone włóknem, (z ang. Fibre Reinforced Polymers),
GFRP	– taśmy z żywicy syntetycznej zbrojone włóknem szklanym, (z ang. Glass Fibre Reinforced Polymers),
GLULAM	– drewno klejone warstwowo (skrót z ang. Glued Laminated Timber)
GR	– pręty z żywicy poliestrowej zbrojone włóknem szklanym,
LVL	– tworzywo drzewne, fornir klejony warstwowo (z ang. Laminated Veneer Lumber),
MES	– metoda elementów skończonych,
OSB	– płyta o ukierunkowanych wiórach płaskich (z ang. Oriented Strand Boards).

1. WPROWADZENIE

Problematyka napraw i remontów zabytkowych konstrukcji drewnianych ma w czasach dzisiejszych zasadnicze znaczenie. Drewno mimo, że w optymalnych warunkach zachowuje niezwykle długotrwałość, to w warunkach przeciętnej eksploatacji obiektów budowlanych ulega niszczeniu szybciej niż inne tworzywa konstrukcyjne. Zarówno budowle całkowicie drewniane jak też wykonane z drewna istotne konstrukcyjnie elementy budynków murowanych poddane są ustawicznemu niszczącemu działaniu czynników atmosferycznych, biologicznych a niekiedy i chemicznych. Często też ulegają destrukcji o różnych rozmiarach w wyniku nieoczekiwanych zdarzeń losowych, z których za najbardziej niebezpieczne uznać można pożary. Wszystko to sprawiło, że elementy drewniane sprzed kilkuset lat są rzadkością. A właśnie drewno było na przestrzeni wieków najpopularniejszym tworzywem budowlanym.

W myśl „Karty Weneckiej” działanie na zabytku ma na celu zachowanie i ujawnienie historycznej, estetycznej wartości obiektu oraz polega na poszanowaniu dawnej substancji i elementów stanowiących autentyczne dokumenty przeszłości. Dopuszcza się jednak wzmocnianie obiektów zabytkowych przy zastosowaniu nowoczesnych technik, konserwatorskich, budowlanych i inżynierskich przy zachowaniu zasad doktryny konserwatorskiej, [13], [25], [200], [221], [246].

Każde planowanie konserwacji konstrukcji wymaga danych jakościowych opartych na bezpośrednich obserwacjach procesu niszczenia materiału i uszkodzeń konstrukcji, badaniach historycznych itp., jak i danych ilościowych opartych na konkretnych testach i modelach matematycznych, jakich używa się w nowoczesnej technice, [97].

W problematyce zachowania substancji elementów drewnianych uwzględnia się nie tylko stan techniczny elementu, ale również wartość artystyczną i kulturową obiektu jako całości wraz z jego detalem zdobniczym występującym niejednokrotnie w postaci oryginalnej snycerki i polichromii.

W konstrukcjach drewnianych najłatwiej destrukcji ulegają stropy drewniane. One też najczęściej wymagają naprawy i wzmocnienia. Stropy te często są zastępowane nowymi rozwiązaniami technicznymi w postaci np. stropów na belkach stalowych lub stropów żelbetowych. W przeważającej liczbie przypadków decyzje o likwidacji tradycyjnych rozwiązań są zbyt pochopne - demontuje się belki, które po wzmocnieniu mogłyby spełniać wymagania związane z nową funkcją obiektu. To samo dotyczy obiektów całkowicie drewnianych, gdzie nagminnie wymieniane są elementy na nowe, wprowadzając też z drewna, ale bez podejmowania próby ich naprawy i wzmocnienia.

Drewniane konstrukcje stropowe sięgają historycznie do najodleglejszych czasów kształtowania przez człowieka obiektów budownictwa i architektury. Do II połowy XIX wieku drewniana belka stanowiła podstawowy element konstrukcyjny płaskich przekryć budowlanych. Dopiero opatentowanie w 1892 roku ceramicznej płyty zbrojonej przez Johanna Kleina mistrza murarskiego z Essen dało podstawy do coraz szerszego wprowadzania innych rozwiązań materiałowych i systematyczną eliminację stropowych, drewnianych konstrukcji belkowych.

Najczęstszymi przyczynami uszkodzeń belek stropowych wg [108] i [112] są:

- niewłaściwe oparcie belek, głównie ze względu na brak właściwej izolacji przeciwwilgociowej pomiędzy murem a belką,
- nieszczelne pokrycia dachowe,
- brak właściwego odprowadzenia wód opadowych,
- uszkodzenia rynien, rur spustowych i obróbek blacharskich,

- brak odpowiedniej wentylacji (możliwość skraplania się oziębionego powietrza na powierzchni drewna; zamknięcie fragmentu konstrukcji drewnianej bez jej wentylacji, możliwości kontroli oraz konserwacji jest błędem projektowym, [119]),
- niewłaściwa eksploatacja stropu (nadmierne obciążenia),
- zastosowanie drewna niezabezpieczonego przed szkodnikami biotechnicznymi.

Istotnym elementem wiedzy o metodach wzmocniania elementów drewnianych jest poznanie rozkładów odkształceń i naprężeń we wzmocnionym elemencie lub konstrukcji. Bez względu na to jaki przyjęto sposób zespolenia elementu wzmocnianego ze wzmocniającym, konieczne jest rozpoznanie rozkładu i dystrybucji naprężeń w czasie, w obydwu adherentach, w celu oszacowania stanu granicznego nośności i odkształcalności samego połączenia, [112], [113].

Wzmocnianie konstrukcji drewnianych przy użyciu żywic epoksydowych jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Dopiero uzyskanie pod koniec lat 60-tych żywic epoksydowych o wysokich cechach wytrzymałościowych spowodowało, że zaczęto podejmować próby ich zastosowania we wzmocnianiu konstrukcji budowlanych. Kompozycje powstałe na bazie żywic syntetycznych mogą być stosowane zarówno do wzmocnień strukturalnych przekrojów, do odtwarzania geometrii przekrojów jak i do wytwarzania połączeń zespalających element wzmocniający z elementem wzmocnianym, [112].

Rozwój technologiczny kompozytów FRP powoduje ich coraz częstsze wykorzystanie do wzmocniania elementów drewnianych zapewniając elementom większą nośność, sztywność, bardziej ujednoliczoną strukturę w porównaniu do elementów konwencjonalnych, niewzmocnionych. Ponadto, te nowe materiały mogą służyć do wzmocniania elementów o złym stanie technicznym (obiekty zabytkowe), [152].

Zalety wzmocnień taśmami zbrojonymi włóknami węglowymi (CFRP) uwidaczniają się zwłaszcza w konserwacji zabytków. Głównie chodzi tu właściwie o stosunek wagi i wymiarów do uzyskiwanych wytrzymałości. Taśmy można ponadto łatwo „ukryć” w przekroju tak, że zachowany jest pierwotny wygląd elementu. Przewodność cieplna kompozytów jest znacznie mniejsza niż stali, co jednocześnie sprawia, że odporność ogniowa konstrukcji z ich użyciem jest większa.

Proponowane w literaturze sposoby wzmocniania z reguły są nie do zaakceptowania w zastosowaniach konserwatorskich - taśmy były zazwyczaj doklejane do zewnętrznych płaszczyzn elementów, jak w konstrukcjach betonowych. W obiektach zabytkowych, ze względu na to że często mamy do czynienia z bogatym wystrojem stropów, właściwszym rozwiązaniem jest „wtopienie” taśm w przekrój drewniany. Pozwala to na wykorzystanie tej metody w pracach konserwatorskich. Ogranicza to również możliwość delaminacji połączenia klejowego „taśma-drewno”, [38], [128].

Polskie przepisy dotyczące budownictwa i ochrony zabytków nie podają w zasadzie jednolitych definicji odtwarzania wartości historycznych, artystycznych, technicznych i użytkowych obiektów budowlanych. W praktyce stosuje się zasady, określenia, wymagania, z których większość zdefiniowano w [212]. Dlatego też do przeprowadzania prac konserwatorskich konieczne jest stworzenie odpowiedniej literatury technicznej, [12].

Jako wzmocnienie należy rozumieć działanie mające na celu zwiększenie wartości cech wytrzymałościowych istniejących elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów. Naprawą czy konserwacją konstrukcyjną określa się natomiast doprowadzenie uszkodzonej konstrukcji lub elementu konstrukcyjnego do stanu pierwotnego, [212].

2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

2.1. CEL PRACY

Celem rozprawy jest analiza deformacji i nośności przekrojów zginanych z drewna litego wzmocnionych przy użyciu CFRP, opracowanie modelu matematycznego pracy belek wzmocnionych w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych i badań numerycznych. Problem szacowania nośności nie jest właściwie rozpoznany w Polsce i na świecie, stąd istnieje konieczność przeprowadzenia badań, wykonania obliczeń numerycznych oraz zaproponowania adekwatnych modeli obliczeniowych. Celem praktycznym jest stworzenie wytycznych podstaw projektowania oraz technologii stosowania badanych typów wzmocnień w praktyce konserwatorskiej.

2.2. ZAKRES PRACY

Praca obejmuje:

1. Przegląd literatury tematu w zakresie wzmocniania drewnianych elementów zginanych wzmocnianych przy użyciu kompozycji epoksydowych, blach stalowych, prętów GR, taśm CFRP i AFRP.
2. Badania pilotażowe mające na celu potwierdzenie zasadności użycia taśm CFRP wklejanych do wnętrza przekrojów drewnianych (wzrost nośności, redukcja odkształceń w drewnie).
3. Badania materiałowe drewna, taśm CFRP i kleju na bazie żywicy epoksydowej.
4. Badanie nośności, ugięć i odkształceń przekrojów drewnianych belek zginanych w skali technicznej, wzmocnionych przy użyciu taśm CFRP, wklejanych do wnętrza przekroju drewnianego.
5. Elastoptyczne badania wybranych modeli belek zginanych.
6. Opracowanie modelu analitycznego opisującego obszar liniowo-sprężysty i obszar niesprężysty pracy przekrojów wzmocnionych.
7. Wykonanie analizy numerycznej metodą MES w zakresie pracy statycznej przekrojów po wzmocnieniu.
8. Przeprowadzenie analizy wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych i teoretycznych.

2.3. TEZY PRACY

Dotychczasowe doświadczenia, przeprowadzone badania własne i obce dotyczące wzmocniania zginanych belek drewnianych taśmami CFRP, poparte przeglądem literatury tematu pozwalają postawić następujące tezy:

- Nośność przekrojów zginanych wykonanych z drewna litego wzmocnianych poprzez wklejenie do wnętrza przekroju taśm CFRP wzrasta a ich odkształcenia maleją.
- Taśmy CFRP i połączenia klejowe mogą być przydatne do wzmocniania stref rozciąganych, zginanych belek drewnianych w przekrojach o nieciągłości lub skręcie włókien.
- Rozkład odkształceń przekrojów w zginanych belkach drewnianych wzmocnionych przy użyciu CFRP jest znacznie bardziej równomierny niż w przekrojach drewnianych litych, niewzmocnionych.

- Istnieje związek konstytutywny dla wzmocnionego przekroju drewnianej belki zginanej w zakresie słabo nieliniowej pracy materiału umożliwiający określenie zastępczej, zmiennej sztywności belki w zależności od stopnia wyężenia przekroju.

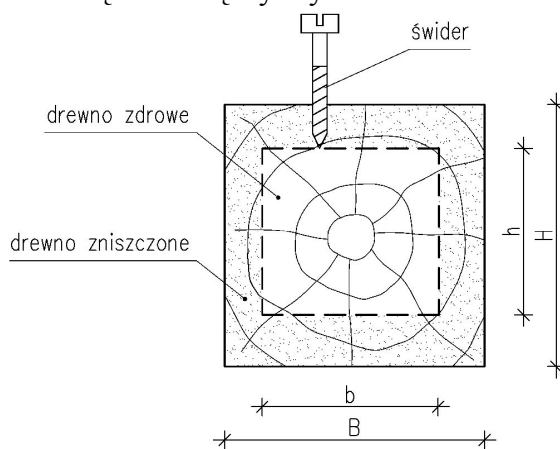
3. ANALIZA LITERATURY PRZEDMIOTU

3.1. DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI DREWNIANYCH

Analiza, której powinny być poddawane historyczne obiekty drewniane w zakresie technicznym powinna zawierać przede wszystkim:

- ocenę jakości (wytrzymałość, gęstość) samego drewna elementów,
- ocenę wilgotności drewna,
- ocenę stanu poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz połączeń (spękania, odkształcenia - zwłaszcza w obszarze połączeń),
- ocenę stanu stabilności całej konstrukcji (przemieszczenia, stateczność),
- ocenę nośności poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz połączeń,
- ocenę mykologiczną,
- przybliżoną ocenę wieku i rodzaju drewna,
- ocenę trwałości, [112].

Jakość drewna można ocenić na podstawie kilku metod, m.in. poprzez odwiert i ocenę uzyskanego urobku. Prosta do zastosowania metodą jest użycie wiertła Pleslera lub wolnoobrotowego zestawu z napędem elektrycznym. Ten sposób pozwala na ocenę zasięgu destrukcji oraz w przybliżony sposób na oszacowanie „zdrowego” przekroju elementu. Przydatną metodą w zakresie oceny wpływu wytrzymałości drewna na nośność elementów jest również metoda Słubnikowa (rys. 3.1), oparta na pomiarze zmniejszenia ciężaru objętościowego drewna, [181]. W tym celu pobiera się próbki z części zdrowej i zniszczonej przekroju, a następnie określa ich ciężary objętościowe. Na tej podstawie, za pomocą tab. 3.1, oblicza się aktualną wytrzymałość drewna.



Rys. 3.1. Schemat sposobu ustalania zasięgu uszkodzeń w przekroju poprzecznym drewna

Tab. 3.1. Zależność między procentem obniżenia się ciężaru objętościowego drewna a procentem obniżenia jego wytrzymałości, [181]

Obniżenie ciężaru objętościowego drewna [%]	Obniżenie wytrzymałości drewna [%]	Współczynnik zmniejszający [-]
1	5-6	0,95
10	30	0,70
20	40	0,60
30-38	100	-

Jakościowych ustaleń obniżenia wytrzymałości drewna dokonuje się również przy użyciu przyrządu optycznego - endoskopu - z końcówką wprowadzoną do odwiertu. Jest to

jednak metoda inwazyjna, wymagająca wykonania odwiertów o średnicy od 5 mm. Pierwszym urządzeniem możliwym do wykorzystania w praktyce do określenia zmian jakości wytrzymałościowej drewna było urządzenie o nazwie *Pilodyn*, wyprodukowane przez szwajcarską firmę *PROCEQ*, do oceny jakości wytrzymałościowej słupów drewnianych ulegających deprecjacji w strefie przygruntowej wskutek rozkładowego działania grzybów, [126]. Urządzenie to umożliwia nieniszczące badanie jakości drewna.

Kolejną metodą, najbardziej zaawansowaną, do oceny jakości drewna jest technika polegająca na pomiarze oporu wiertła igłowego wprowadzanego do przekroju (wiertło Siberta - od roku 1989 lub rezystografu - od 1992 r.). Rezystograf mierzy opory wiercenia obracającej się igły o średnicy 1 mm, ujawniając zmiany gęstości drewna powodowane destrukcją biologiczną lub wilgotnościową oraz kolejne przyrosty roczne. Z tego względu tę metodę można uznać za quasi-nieniszczącą. Jest ona przydatna w obiektach historycznych.

Metody niszczące, polegające np. na badaniu rdzeni, pobranych dokonywanym za pomocą wiertel o specjalnych końcówkach [245], są, z reguły, niedopuszczalne z konserwatorskiego punktu widzenia.

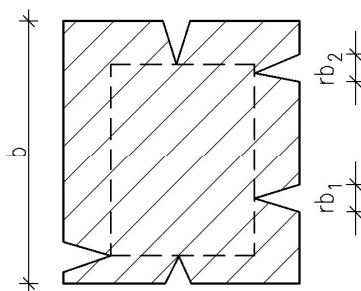
Badania stricte nieniszczące oceny jakości drewna są oparte na zjawisku propagacji fal akustycznych wzbudzanych akustycznie bądź ultradźwiękowo, [143]. Wilgotność, gęstość i wady drewna mają wpływ na prędkość rozchodzenia się fal. Jest to metoda pośrednia, trudna do zastosowania w drewnie, a uzyskiwane wyniki nastroczają dużych trudności w interpretacji. Metoda nie powinna być stosowana bez weryfikacji wyników innymi metodami. Jest bardziej przydatna do badania dużej populacji elementów wykonanych z podobnego drewna i o podobnym kształcie, [112]. Defektoskopia dźwiękowa służy, przede wszystkim, do badania płyt rezonansowych używanych do wyrobu instrumentów muzycznych oraz płytowych elementów drewnopochodnych.

W wyniku naturalnych procesów starzenia materiału poddanego działaniu sił, w belkach drewnianych powstają głębokie spękania, których głębokość często przekracza 1/10 wysokości lub szerokości elementu. Jeżeli dla elementu drewnianego określi się sumę pęknięć wzdłuż włókien (szerokość pęknięcia \times głębokość pęknięcia) po jednej stronie elementu (rys. 3.2), to na podstawie tab. 3.2, w zależności od tego, czy suma ta jest mniejsza od 1/20, czy od 1/10 szerokości przekroju elementu, można przyjąć współczynniki, [181]:

- α - zmniejszający powierzchnię elementu A ,
- β - zmniejszający wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie W_y .

Tab. 3.2. Współczynniki zmniejszające α i β , [181]

Suma pęknięć	Współczynnik α	Współczynnik β
< 1/10 szerokości przekroju	0,95	0,91
< 1/20 szerokości przekroju	0,98	0,96



Rys. 3.2. Schemat spękań w przekroju poprzecznym belki drewnianej

Na nośność belki wpływa nie tylko względna głębokość pęknięcia, ale również jego usytuowanie w przekroju, dlatego podane zależności należy jednak traktować jedynie orientacyjnie.

Przy doborze techniki wzmocnienia konstrukcyjnego, jak również różnego rodzaju środków konserwujących i impregnatów do impregnacji strukturalnej konieczna jest ocena wilgotności elementów drewnianych. Wilgotność jest również istotna przy ocenie zastosowanego w naprawie czy wzmocnieniu nowego drewna, poddanego zabiegom impregnacji. W praktyce bowiem, impregnowane, nowe drewno nie jest sezonowane, często natomiast jest wbudowywane natychmiast po impregnacji, [173]. Wraz ze zmianami wilgotności drewna w przedziale higroskopijnym, zmieniają się jego wymiary i objętość. Proces ten może zachodzić dwukierunkowo, a jego następstwem jest kurczenie się lub pęcznienie drewna. Mokra tarcica najintensywniej wysycha na powierzchni. Warstwy zewnętrzne szybko osiągają wilgotność poniżej punktu nasycenia włókien i zaczynają się kurczyć. Od tego momentu w warstwach pojawią się coraz silniejsze naprężenia rozciągające. Gdy wartość tych naprężeń przekroczy wytrzymałość drewna, wynikającą z sił spójności, pojawiają się pęknięcia powierzchniowe i deformacje. Najczęściej pęknięcia powstają wzdłuż najsłabszych elementów strukturalnych drewna, czyli promieni rdzeniowych zbudowanych z komórek miękiszowych, [130].

Określenie wilgotności drewna można wykonać za pomocą laboratoryjnych metod: suszarkowo-wagowej i destylacyjnej. Dają one bardzo dokładne wyniki jednak są metodami niszczącymi, wiążą się z pobraniem próbek, co w odniesieniu do drewna obiektów zabytkowych czyni je nie nadającymi się do zastosowania.

W obszarze badań nieniszczących do pomiaru wilgotności drewna stosuje się wilgotnościomierze elektryczne. Zaletą tej metody jest możliwość stosowania w warunkach polowych ze względu na niezależne zasilanie, małe gabaryty, natychmiastowe odczyty wyników, [130]. Spośród wilgotnościomierzy elektrycznych wyróżnia się wilgotnościomierze elektryczne i oporowe. Te pierwsze to mierniki stykowe, przy czym powinna być tu znana gęstość drewna, trudna do pozyskania w pomiarze praktycznym na obiekcie. Stąd miernik kalibrowany jest zazwyczaj dla przeciętnej gęstości badanego gatunku drewna. Również dokładna głębokość, na której uśredniamy pomiar, nie jest znana. Częściej stosowane są wilgotnościomierze oparte na pomiarze oporności elektrycznej pomiędzy dwoma czujnikami wprowadzanymi w drewno. Pomiar jest zwykle dokonywany do głębokości ok. 6 mm, co jest wadą gdyż drewno powierzchniowo bardzo szybko wysycha. Poza tym wtrącenia chemiczne jak np. sole mogą spowodować błędy w pomiarze, [245]. Pomiar wilgotności na większych głębokościach (do 30 mm) umożliwiają tzw. czujniki młotkowe. Możliwy jest również pomiar przez użycie dwóch osobnych elektrod w nawierconych otworach, o ile z uwagi na historyczną wartość elementu taka ingerencja jest dopuszczalna, [112].

Kolejnymi metodami nieniszczącymi pozwalającymi na ustalenie wilgotności drewna są: pomiar metodą bezstykową na podstawie strat energii promieniowania mikrofalowego oraz pomiar metodą bezstykową, radiologiczną, [210].

W procesie konserwacji często istotny jest dobór drewna o podobnym wieku jak drewno elementów konserwowanych. Do oceny wieku drewna pozostają w dyspozycji: dendrologia i datowanie radiowęglowe (metody izotopowe). Dendrologia to nauka o datowaniu wieku drewna polegająca na zbadaniu wzrostu przy pomocy analizy słojów rocznych próbki i porównaniu z chronologią dla danego regionu jako bazą odniesienia. Roczne przyrosty nie są stałe i zależą od bardzo wielu czynników, m.in. od: opadów, ekspozycji, temperatury, nasłonecznienia. Stąd konieczne jest ustalenie danych bazowych, średnich dla różnego rodzaju drzew w danym regionie. Istotne jest, by próbki z drewna wbudowanego pobierać z kierunku promieniowego i z elementów zawierających pełny

przekrój rdzeniowy, [112]. Datowanie poprzez izotopowe badania uważa się za skuteczne dla drewna w wieku co najmniej 200 lat, [210]. Określony wiek na podstawie prędkości rozpadu izotopu C24 odnosi się do daty ścięcia drzewa, co nie musi być tożsame z datą wbudowania.

Jednym z podstawowych warunków przeprowadzenia skutecznego remontu elementów bądź całej konstrukcji drewnianych jest również przeprowadzenie badań mykologicznych. Zagadnie mykologii drewna jest wyczerpująco opisane m.in. w [131], [132], [172], [239].

Podkreślić należy, że w praktyce konserwatorskiej obserwuje się niską wiedzę w zakresie skutecznych zabezpieczeń bio- i ogniochronnych, ich wzajemnej kompatybilności oraz wpływów negatywnych, które mogą wystąpić w konstrukcji przy ich niewłaściwym stosowaniu. Nagminnie nie są przestrzegane stężenia środków, a niejednokrotnie, wobec niedostatecznych nadzorów konserwatorskich, impregnacje są w ogóle nie stosowane, często dochodzi jedynie do zabarwień drewna nowowbudowywanego wyłącznie środkami barwiącymi. Mylone są zabezpieczenia przeciwko grzybom domowym a grzybom pleśniowym, stosowane środki solne ze środkami oleistymi, etc. Nie są przestrzegane wymagania dotyczące konieczności posiadania przez środek i producenta tzw. Aprobaty Technicznej często mylonej z Certyfikatem Państwowego Instytutu Higieny lub Certyfikatem Bezpieczeństwa, [112].

Kompleksowa impregnacja obejmuje także wspomnianą wcześniej ochronę przeciwogniową. Często stosowanym kryterium, które powoduje rezygnację z użycia elementów budowlanych wykonanych z drewna, jest jego palność. Wbrew pozorom materiał trudno zapalny i palny w czasie pożaru będzie się palił. Niezapalność i trudnozapalność należy raczej wiązać z oceną możliwości zapalenia materiału przy użyciu określonego bodźca (np. promieniowanie cieplne czy żar) niż z jego zachowaniem się w czasie pożaru. Pokrycie lub nasycenie drewna powszechnie dostępnymi środkami ogniochronnymi sprawia, że poddane badaniom normowym klasyfikowane jest jako materiał trudno zapalny lub niezapalny, [179]. Niezależnie od prowadzonych działań konserwatorskich, w tym zabezpieczeń powierzchniowych, konieczne jest wprowadzenie do zabytkowych obiektów drewnianych nowoczesnych systemów instalacji przeciwpożarowych, [102]. Szczególnie w przypadku obiektów budownictwa przemysłowego istotne znaczenie ma zagrożenie pożarem, ze względu na procesy technologiczne, [123]. Warto podkreślić, że PN-B 03150 [191] nie traktuje o odporności ogniowej. Wytycznych do projektowania w tym zakresie należy szukać np. w instrukcjach ITB lub w [47] oraz w drugiej części Eurocodu 5, [64]. Informacje dotyczące oceny odporności ogniowej konstrukcji drewnianych można znaleźć również w [133], [134], [241].

Wprowadzanie np.: drewna niezabezpieczonego w konserwacji konstrukcyjnej może prowadzić do olbrzymich strat powodujących niewłaściwe wykorzystanie środków, których pozyskanie na prace eliminujące błędy konserwatorskie, ponownie dla tego samego obiektu, może nie być możliwe. Nawet z pozoru błaha niedopatrzenia jak zastosowanie niezabezpieczonych łąt (czy deskowań) o nie okorowanych krawędziach np.: przy wymianie pokrycia gontowego może prowadzić do dotkliwych następstw (rozwój biodestrukcji w elementach konstrukcyjnych więźb).

W historycznych obiektach drewnianych występują z reguły znaczne deformacje elementów i przemieszczenia całej konstrukcji. Przed podjęciem działań likwidujących deformacje i przemieszczenia potrzebna jest dokładna ocena ich wartości i analiza ich znaczenia dla stateczności konstrukcji. Ogólnie należy unikać tzw. „prostowania” konstrukcji (np. przez lewarowanie), jeżeli pomiary i obliczenia przemieszczeń nie wykazują konieczności przeprowadzenia takich prac. Potrzebny jest tutaj natomiast stały

nadzór - monitoring przemieszczeń i odkształceń. Z reguły wymaga to zaangażowania metod geodezyjnych lub czujników indukcyjnych.

Wszelkie zmiany stanu odkształceń, a tym samym naprężeń w elementach konstrukcji i węzłach wywoływane przez ingerencję zewnętrzną mogą prowadzić do niekontrolowanej utraty stateczności konstrukcji. Działanie konserwatorskie powinno w takich sytuacjach uwzględniać faktyczny stan odkształceń oraz naprężeń i stabilizować go poprzez wprowadzanie elementów konstrukcyjnych możliwych do zaakceptowania z punktu widzenia zasad i doktryn konserwacji, przy założeniu, że konstrukcja utrzymuje swoją równowagę i zachowane jest bezpieczeństwo. Unikać raczej należy działań i metod wzmocniających, które wykorzystują zmianę schematu statycznego konstrukcji. W przypadkach szczególnie trudnych do oceny w zakresie stateczności (bezpieczeństwa) obiektu, konieczne może okazać się stworzenie modelu analitycznego konstrukcji i wyznaczenie bezpiecznych odkształceń i naprężeń przez modelowanie numeryczne przy założonych, spodziewanych, a możliwych do zaistnienia układach obciążeń związanych głównie z obciążeniem poziomym oraz obciążeniem wynikającym z narastających przemieszczeń. Nie należy również zapominać o składowych pionowych obciążeniach, które przy zaistnieniu np. nierównomiernego osiadania gruntu pod posadowieniem obiektu mogą wywołać dodatkowe przemieszczenia i siły poziome. Ocenie stateczności musi, rzecz jasna, towarzyszyć ocena nośności i ugięć poszczególnych elementów konstrukcji, uwzględniająca rzeczywiste, pracujące przekroje i ocena stanu węzłów (połączeń), kluczowa dla doboru metody wzmocnienia lub naprawy.

Wydaje się, że obiekt zabytkowy, mieszczący się w pojęciu obiektu budowlanego, również w sensie założonego okresu trwałości może trwać przez okres nieokreślony pod warunkiem przeprowadzania szczegółowych, systematycznych ocen jego stanu technicznego i zapewnieniu właściwej konserwacji, [112].

Należy zwrócić uwagę, że w rozumieniu wymagań stawianych obiektom budowlanym przez prawo budowlane obiekty budowlane wpisane do rejestru zabytków, wyróżniają się jedynie tym, że ich odbudowa, przebudowa, modernizacja, rozbiórka wymaga, przed wydaniem decyzji o pozwoleniu na budowę, uzyskania zezwolenia wojewódzkiego konserwatora zabytków. W związku z powyższym wymagania bezpieczeństwa konstrukcji stawiane budynkom zabytkowym są te same, co stawianie budynkom nie wpisanym do rejestru zabytków, [142].

3.2. PRZYCZYNY WYKONYWANIA WZMOCNIEŃ KONSTRUKCJI DREWNIANYCH

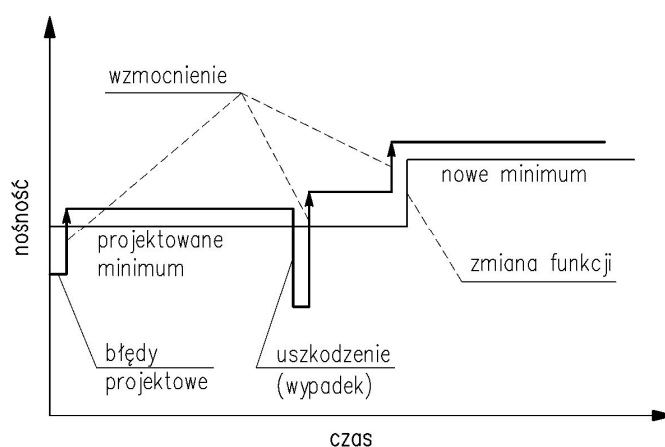
Potrzeba wzmocnienia czy naprawy konstrukcji wynikać może z bardzo wielu przyczyn, [154], m.in.:

- destrukcyjnych działań otoczenia:
 - czynników atmosferycznych (opadów, zmian wilgotności),
 - czynników chemicznych,
 - czynników biologicznych,
 - zmian temperatury,
- uszkodzeń konstrukcji,
- zwiększenia obciążeń eksploatacyjnych wynikających ze zmiany sposobu użytkowania konstrukcji,
- błędów popełnionych w projektowaniu bądź wykonawstwie konstrukcji,
- niedoszacowanych zjawisk opóźnionych,
- nieodpowiedzialnego działania człowieka.

Wymienione powyżej przyczyny mogą występować oddzielnie lub co ma znacznie częściej miejsce - sumować się. Wymusza to na projektancie uwzględnienie nie tylko

dotychczasowych obciążeniach konstrukcji, w przypadku potrzeby zwiększenia nośności lub sztywności konstrukcji drewnianych, ale także uwzględnienie aktualnego stanu technicznego wzmocnianych elementów oraz możliwości zastosowania konkretnego rozwiązania.

Kilka powodów wykonywania wzmocnienia przedstawiono na rys. 3.3. Konieczność realizacji wzmocnienia może wystąpić gdy okaże się, że konstrukcja (element) ma niewystarczającą nośność ze względu na błędy projektowe. Kolejnym powodem, po pewnym czasie użytkowania, są różnego rodzaju uszkodzenia na skutek przeciążenia, pożaru, oddziaływań sejsmicznych [122], etc., które mogą spowodować, że zakładana nośność zostanie obniżona. Po wykonaniu wzmocnienia (uzyskaniu wymaganej, satysfakcjonującej nośności) i upływie pewnego czasu może okazać się, że wymagania użytkownika obiektu zmieniły się - obecna nośność okazuje się być niewystarczającą. Podejmowane są kolejne prace wzmocniające mające na celu uzyskanie wyższej nośności, [40].



Rys. 3.3. Historia „życia” konstrukcji, [40]

Obniżenie wytrzymałości i sztywności konstrukcji następuje również w wyniku naturalnych procesów starzenia się drewna. Drewno w dobrym stanie może przetrwać w dwóch środowiskach: suchym lub wodnym, gdzie rozkład powodowany przez mikroorganizmy jest bardzo spowolniony i ograniczony. Trwałość drewna najbardziej zmniejsza zmienna wilgotność, [130]. Wg [91] naturalnym starzeniem się drewna jest proces nieodwracalnych zmian w wyglądzie i właściwościach pod wpływem działania promieniowania słonecznego, powietrza i zawartego w nim tlenu, zmian temperatury i wilgotności, naprężeń statycznych i dynamicznych, przy czym zakłada się tutaj brak oddziaływania czynników biologicznych. W odniesieniu do konstrukcji historycznych pamiętać należy, że jeszcze na początku naszego wieku temperatura pomieszczeń była średnio nawet 10°C niższa od obecnych, a co za tym idzie panowały również inne warunki wilgotnościowe, [130].

W wyniku utrzymywania się przez dłuższy czas nadmiernej wilgotności elementów drewnianych następuje nieunikniony rozwój szkodników biologicznych, takich jak grzyby domowe lub grzyby pleśniowe, powodujących degradację drewna aż do całkowitego zniszczenia, [68]. Zróżnicowane formy niszczenia wywołane działaniem szkodników biologicznych nazywamy ogólnie korozją biologiczną.

Równie duże straty co grzyby powodują w budownictwie drewnianym owady - techniczne szkodniki drewna. Wprawdzie zniszczenia te ograniczają się tylko do jednego materiału w budynkach - drewna litego - lecz z uwagi na znacznie trudniejszą niż przed grzybami domowymi ochronę drewna, zniszczenia spowodowane przez owady są liczniejsze od powodowanych przez grzyby. Szkodliwość owadów polega na niszczeniu

drewna przez drażnienie chodników larwalnych i otworów wylotowych na powierzchni drewna, co prowadzi do znacznego obniżenia wytrzymałości porażonego drewna, a nawet do jego całkowitego zniszczenia, [108].

Przyczyny powstawania uszkodzeń w stropach drewnianych, które najłatwiej ulegają destrukcji spośród konstrukcji drewnianych przytoczono w rozdz. 1.

Obszerniej temat uszkodzeń samego drewna jak i konstrukcji drewnianych oraz ich skutków opisany jest m.in. w [154], [162], [211], [239].

3.3. METODY WZMACNIANIA I NAPRAWY ELEMENTÓW KONSTRUKCJI DREWNIANYCH

Założono, o czym wspomniano już wcześniej, że naprawą czy konserwacją konstrukcyjną określa się doprowadzenie uszkodzonej konstrukcji lub elementu konstrukcyjnego do stanu pierwotnego, zaś przez wzmocnienie należy rozumieć działanie budowlane mające na celu zwiększenie wartości cech wytrzymałościowych istniejących elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów, [212].

Metody wzmocniania belek drewnianych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

1. Zabezpieczenia i wzmocnienia konstrukcyjne obejmujące wprowadzenie dodatkowych elementów:
 - niezależne wzmocnienie konstrukcji,
 - podwieszony układ konstrukcyjny,
 - wzmocnienie współpracujące z istniejącym układem konstrukcyjnym.
2. Zabiegi strukturalne polegające na zwiększeniu (ulepszeniu) własności technicznych i eksploatacyjnych uszkodzonych elementów.

Inny podział metod wzmocniania związany jest z pracą statyczną konstrukcji po wzmocnieniu. Tu także można wyróżnić dwie zasadnicze grupy:

1. Metody wzmocniania ze zmianą schematu statycznego.
2. Metody wzmocniania bez zmiany schematu statycznego.

W miarę rozwoju sztuki inżynierskiej metody napraw i remontów konstrukcji drewnianych podlegały ewolucji, której uwarunkowania leżały nie tylko w sferze techniki, ale także ekonomii oraz estetyki. Szczególnie w czasach obecnych konserwacja budowli zabytkowych musi odbywać się w taki sposób, by w jak największym stopniu zachować pierwotny stan oraz podkreślić historyczne i estetyczne walory remontowanych i modernizowanych obiektów, [78].

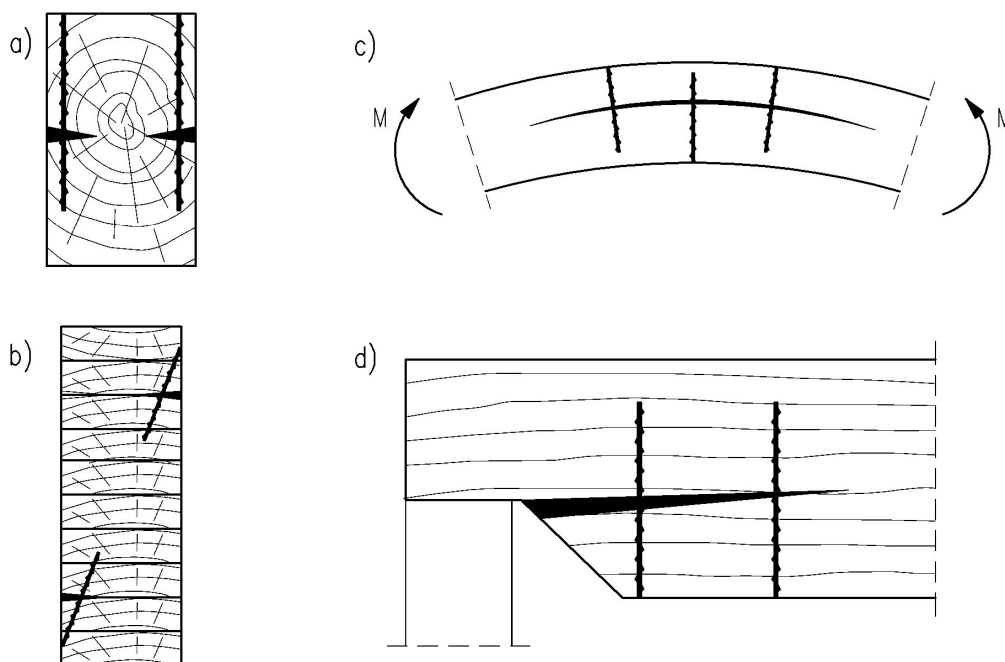
W praktyce konserwatorskiej konwencjonalne metody wzmocniania konstrukcji drewnianych stanowią alternatywę dla wymiany elementów na nowe, pozwalając na zachowanie zasady autentyczności. Zbyt często podejmowane są decyzje o demontażu starej konstrukcji i zastąpieniu jej nową np. wymiana stropów drewnianych na stropy masywne. To z kolei wpływa na zmianę obciążeń całego układu konstrukcyjnego obiektu oraz podłoża gruntowego i powoduje zjawiska niebezpieczne, zarysowania ścian nośnych, nierównomierne osiadanie podłoża pod fundamentami, zniszczenia infrastruktury instalacyjnej. Zjawiska te są również niebezpieczne ze względu na swój opóźniony charakter.

Tradycyjne metody wzmocniania konstrukcji drewnianych za pomocą nakładek drewnianych, płaskowników i kształtowników stalowych, zewnętrznych cięgien stalowych itd. opisane są, w wyczerpujący sposób, w literaturze, m.in. w [104], [112], [113], [154], [164], [211].

Jedną z metod wzmocniania stropowych belek drewnianych jest ich zespolenie z płytą żelbetową. Celem połączenia drewna z betonem w konstrukcji jest racjonalne

wykorzystanie właściwości obu materiałów: dużej wytrzymałości betonu na ściskanie oraz znacznej wytrzymałości drewna na rozciąganie, [30]. Pierwsze rozwiązania połączeń w stropach drewniano-żelbetowych realizowane były wyłącznie przez odpowiednie ukształtowanie górnej powierzchni belki. Następnie stosowano jako łączniki m.in. profile stalowe oraz gwoździe. Pierwsze w Polsce badania tego zagadnienia zostały podjęte na przełomie lat 70. i 80. przez Godyckiego-Ćwirko. W literaturze zagadnienie zespolenia płyty żelbetowej z belkami drewnianymi jest opisane m.in. w [30], [35], [77], [81].

Podczas napraw konstrukcji drewnianych stosuje się przeważnie złącza mechaniczne na gwoździe, śruby, wkręty, itp. Pewnym novum w zakresie połączeń mechanicznych jest system Helifix. Pręty spiralne systemu wykonywane są z wysokowytrzymałej nierdzewnej stali austenicznej. Ich spiralny kształt zapewnia dużą wytrzymałość na obciążenia wrywające. Pręty są wkręcane, ewentualnie kotwione dodatkowo przy zastosowaniu kompozycji klejowej. Dopuszcza się wykonywanie zakotwień wzdłuż włókien. Szczególnie efektywne może być zastosowanie prętów do scalenia spękanych obszarów elementów drewna zarówno litego, jak i klejonego warstwowo. Dotyczy to, przede wszystkim, zarysowań i spękań natury skurczowej, których propagacja w stosunku do szerokości przekroju lub długości elementu może doprowadzić do jego stanu awaryjnego - rys 3.4 a), b). Stosując pręty spiralne można zapobiec rozwarstwieniu elementów drewnianych w obszarach występowania, rozciągających w poprzek włókien, naprężeń normalnych - rys 3.4 c), d), [75], [76], [177]. Do zalet tych złączy można zaliczyć ich niewidoczność (całkowite ukrycie w elemencie wzmocnianym) co jest istotne dla konstrukcji zabytkowych, [138].



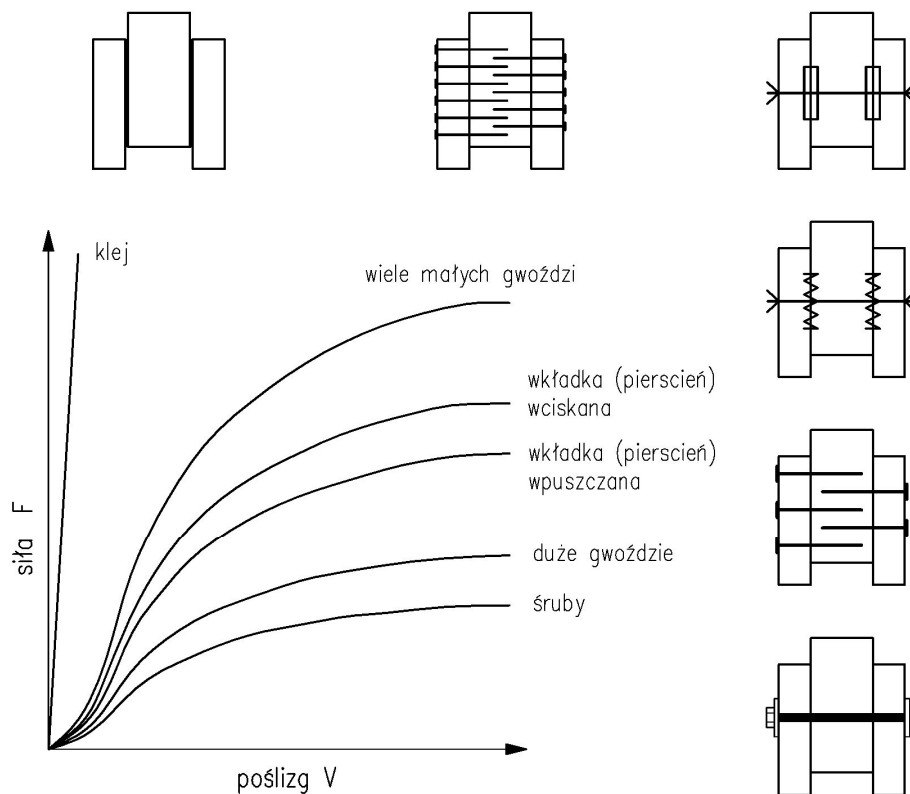
Rys. 3.4. Naprawa zarysowań i spękań prętami spiralnymi: a) elementów z drewna litego, b) dźwigarów z drewna klejonego warstwowo, c) dźwigarów o osi zakrzywionej, d) belek podciętych przy podporach, [76]

Od momentu opanowania, w latach 60., masowej produkcji żywic epoksydowych o wysokich cechach wytrzymałościowych nastąpiło zwiększenie efektywności metod konserwacji, naprawy i wzmocnienia elementów konstrukcyjnych z drewna, [50], [201]. Występowanie w cząsteczce żywicy epoksydowej różnych grup funkcyjnych zarówno polarnych, jak i niepolarnych jest przyczyną dużej adhezji tych żywic do wielu materiałów o odmiennym charakterze, [244]. Stosowanie szerokiej gamy żywic i techniki klejenia powoli staje się uznanym sposobem wzmocnienia konstrukcji drewnianych, jak i ich

konserwacji, [36], [43], [238], [240]. Technologie naprawy i wzmocnienia konstrukcji rozwinęły się w czterech zasadniczych kierunkach, [112]:

- impregnacji powierzchniowych, mających na celu zabezpieczenie konstrukcji przed szkodnikami biologicznymi, zawilgoceniem i podniesienie jej trwałości,
- impregnacji wgłębnych, mających na celu wzmocnienie strukturalne materiału elementu konstrukcji, zwiększenie sztywności i nośności (lub przywrócenie pierwotnych cech mechanicznych),
- iniekcji spękań, zarysowań, uzupełniania przekrojów elementów konstrukcji,
- stosowania kompozycji żywicznych jako spoin łączących element wzmocniany z elementem wzmocniającym.

Zagadnienie połączeń (spoin klejowych) zespalających element wzmocniany z elementem wzmocniającym jest o tyle ważne, że kompleksowe rozwiązanie problemu ich obecności na pracę konstrukcji mogłoby, prowadzić do wyeliminowania bądź znacznego ograniczenia, przy wzmocnianiu konstrukcji drewnianych, różnych łączników mechanicznych, a wprowadzenie w ich miejsce, wyłącznie lub prawie wyłącznie, połączeń klejowych. Interesującą koncepcję łączników mechano-klejowych, łączących w sobie zalety łączników mechanicznych i złączy klejowych, przedstawiono w [117]. Podatność połączenia drewnianego przy zastosowaniu różnego rodzaju łączników przedstawiono na rys. 3.5, [86]. Nieuwzględnienie podatności przy wymiarowaniu może prowadzić do zawyżenia efektu wzmocnienia nawet o kilkadziesiąt procent, [112].



Rys. 3.5. Podatność połączeń, [86]

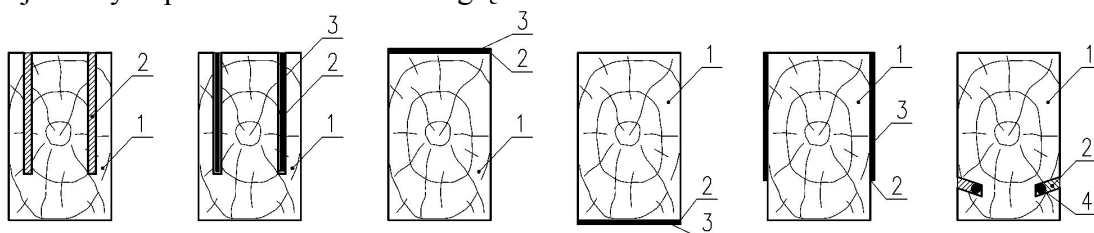
W elementach zginanych o nośności decyduje, z reguły, strefa rozciągana przekroju. Wady drewna w strefie rozciąganej w znacznie większym stopniu obniżają nośność elementu aniżeli w strefie ściskanej. Jednym ze sposobów jej wzmocnienia jest wklejenie zbrojenia. Połączenia zbrojenia z drewnem wykonuje się przede wszystkim za pomocą epoksydowych kompozycji klejowych.

W Polsce zagadnieniem zbrojenia strefy rozciąganej belek klejonych warstwowo

zajmował się m.in. R. Ganowicz. W tym celu powstał w Poznaniu prototypowy obiekt z zastosowaniem tych elementów jako płatwi dachowych, [70].

Wzmocnianie belek z drewna klejonego warstwowo wzmocnionych prętami lub blachami stalowymi opisano, wraz z propozycją szacowania nośności, m.in. w [165].

Skuteczność wzmocniania stałą belek drewnianych badał również J. Jasieńko, [106], [110], [111], [112], [113] - rys 3.6. Wykazano, że wzrosty nośności w stosunku do belek świadkowych wykonanych zarówno z nowego jak i starego drewna wynoszą nawet 100%. Wzrostowi nośności towarzyszył również wzrost sztywności wzmocnionych belek. Stwierdzono, że najbardziej korzystne ze względu na pracę połączeń klejowych, w przypadku wzmocniania blachami stalowymi są blachy grubości od 2 do 5 mm. Blachy grubsze nie zapewniają do końca pracy belki jako elementu zespolonego, ze względu na zbyt duże różnice sztywności pomiędzy drewnem i blachami, [140]. Analiza uzyskanych wyników badań pozwala stwierdzić, że wklejenie w strefę rozciąganą prętów zbrojeniowych pozwala zredukować ugięcie do 60%.



Rys. 3.6. Przykłady wzmocnienia drewna stalą i żywicą epoksydową, [110], [111], [112]
1 - wzmocniana belka drewniana, 2 - kompozycja epoksydowa, 3 - blacha stalowa

Zbrojeniem wklejanym, obok prętów, płaskowników stalowych i blach mogą być również inne elementy: pręty żywiczne zbrojone włóknem szklanym [222], [223], węglowym [56] lub taśmy kompozytowe FRP zbrojone włóknami węglowymi, aramidowymi czy szklanymi. Jedną z zalet materiałów FRP jest ich kompatybilność z drewnem - podobna rozszerzalność termiczna.

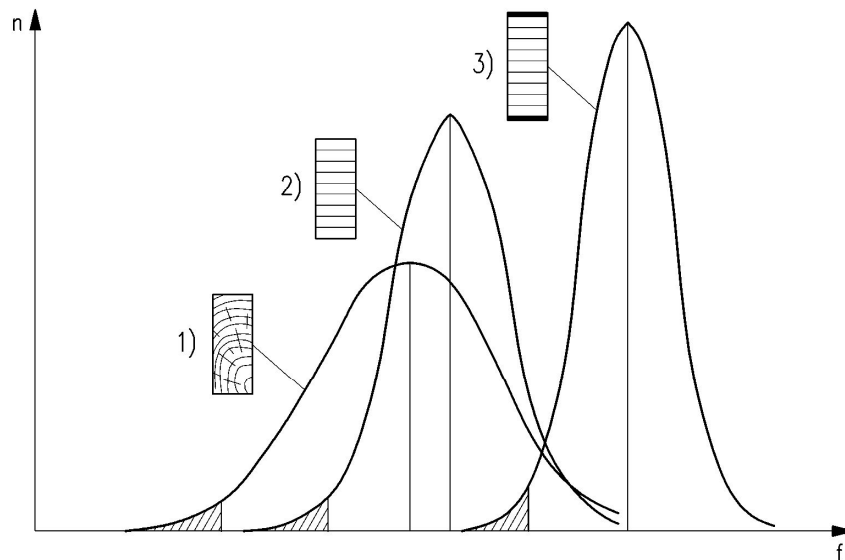
Propozycję wzmocnienia konstrukcji drewnianych, zwłaszcza zabytkowych, za pomocą kompozytów polimerowych przedstawiono w [247]. Prace nad doбором kompozytów polimerowych oraz opracowania z zakresu wzmocniania i rehabilitacji elementów konstrukcji drewnianych prowadzone są m.in. w Politechnice Świętokrzyskiej. Dotychczas stwierdzono, że zaproponowane wzmocnienia strukturalne można stosować w szczególności do: rekonstrukcji stref przypodporowych belek, wzmocniania uszkodzonych fragmentów na całej długości belki oraz uciągania swobodnie podpartych układów belkowych.

Zbrojenie belek czy dźwigarów wykonywanych z drewna klejonego warstwowo (GLULAM) materiałami FRP pozwala na uzyskiwanie większych rozpiętości oraz redukuje ciężar konstrukcji. Wkładki FRP można umieszczać pomiędzy lamelami w procesie produkcji, [79], [92], [242]. Należy jednak podkreślić, że fabryczne wzmocnienie belek drewnianych jest tylko racjonalne w przypadku konieczności zwiększenia nośności, przy limitowanej wielkości np., wysokości przekroju. Ciągłe jeszcze cena belki wzmocnionej „wzrasta” szybciej niż jej nośność, [161]. Zastosowanie zbrojenia w postaci wkładek FRP zwiększa nośność, ale również ujednocila cechy wytrzymałościowe przekrojów - rys. 3.7, [9].

Szczegółowe informacje na temat wzmocniania elementów drewnianych materiałami CFRP zamieszczono w rozdz. 3.5, 3.6, 3.7.

W zbrojeniu drewna istotnym problemem jest zakotwienie prętów, blach, taśm w ośrodku kotwiącym (drewnie) oraz szacowanie nośności połączeń klejowych „element

wzmacniająco-drewno”. Zagadnienie to szerzej opisano w [11], [41], [44], [48], [84], [105], [107], [109], [166], [167], [199].



Rys. 3.7. Charakterystyka: 1) drewna litego, 2) drewna klejonego warstwowo, 3) drewna klejonego warstwowo, wzmocnionego FRP, [9]

3.4. MATERIAŁY KOMPOZYTOWE

3.4.1. Podstawowe informacje o materiałach kompozytowych

Specyfika konstrukcji budowlanych sprawia, że budownictwo ogólne jest dość konserwatywne, jeśli chodzi o wykorzystywanie nowoczesnych, zaawansowanych technologicznie materiałów. Na wspomnianą specyfikę składają się takie czynniki, jak: możliwie najniższe koszty budowli, dążenie do prostego procesu ich wznoszenia, łatwość wytwarzania materiałów budowlanych itd., [73]. W budownictwie rozwój zastosowania kompozytów nastąpił, wraz z rozwojem żywic, w latach sześćdziesiątych, [89].

Pojęcie materiał kompozytowy (łac. compositus = złożony) oznacza materiał, który jest zbudowany z co najmniej dwóch różnych składników, przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym, [74]. Kompozyt wykazuje inne właściwości niż jego materiały składowe.

Zainteresowanie kompozytami wynika z dwóch podstawowych przesłanek: pierwsza - to ich doskonałe parametry fizyczne i wytrzymałościowe, a druga - to mały ciężar właściwy. Z jednoczesną kombinacją tych cech mamy do czynienia w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich wykorzystanie w konstrukcjach, dla pracy których ta kombinacja ma pierwszorzędne znaczenie.

Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz - fazy ciągłej zwanej osnową (matrycą), otaczającej fazę drugą, tzw. fazę rozproszoną, zwaną także zbrojeniem. Wypadkowe własności kompozytu są zależne od własności faz składowych, ich ilości w ogólnej objętości kompozytu, sposobu rozmieszczenia fazy rozproszonej w osnowie, a także cech geometrycznych fazy rozproszonej.

Dzięki możliwości budowy materiału o własnościach anizotropowych istnieje możliwość dostosowania wartości wytrzymałości oraz kierunków anizotropii do stanu naprężenia materiału, [55].

W zależności od rodzaju fazy rozproszonej materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty [22], [55], [71], [73]:

- zbrojone cząstkami (najpopularniejszym kompozytem zbrojonym cząstkami jest beton),
- zbrojone dyspersyjnie, które różnią się od kompozytów zbrojonych cząstkami tym, że wzmocnienie zachodzi na poziomie mikroskopowym (atomowym lub molekularnym),
- zbrojone włóknami, które ze względu na sposób ułożenia włókien można podzielić na:
 - kompozyty jednokierunkowo zbrojone włóknem ciągłym,
 - kompozyty zbrojone ortogonalnie, np. tkaniną,
 - kompozyty z dowolnie ułożonymi włóknami ciągłymi,
 - kompozyty z dyskretnymi (krótkimi) włóknami.

W praktyce stosowane są kompozyty warstwowe, które są układem połączonych ze sobą warstw zbrojonych jednokierunkowo lub ortotropowo (dwukierunkowo), [55].

3.4.2. Kompozyty zbrojone włóknami

Kompozyty zbrojone włóknami to te, w których w charakterze fazy wzmocniającej wykorzystywane są różnego rodzaju włókna. Zasadniczym celem wprowadzenia włókien do kompozytów konstrukcyjnych jest uzyskanie podwyższenia wskaźników wytrzymałościowych materiału, który staje się kompozytem. Włókna stanowią element nośny (w przybliżeniu im wyższa jest ich wytrzymałość tym wyższe są wskaźniki wytrzymałościowe kompozytu), natomiast osnowa służy jako spoiwo łączące włókna, [71]. Osnowa zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim stopniu uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Kompozyty włókniste są najbardziej efektywnymi spośród materiałów kompozytowych, w tym sensie, że wykazują najlepsze własności fizyczne i wytrzymałościowe przy najmniejszym ciężarze właściwym. W kompozytach włóknistych jako osnowy stosuje się metale i żywice polimerowe.

Powszechnie wiadomo, że teoretyczna wytrzymałość ciał zwiększa się zazwyczaj wraz ze wzrostem modułów sprężystości i maleje wraz ze wzrostem odległości między sąsiednimi atomami. Wytrzymałe materiały powinny więc charakteryzować się wysokimi modułami sprężystości i możliwie dużą liczbą atomów w objętości jednostkowej. Wymaganiom tym odpowiadają: beryl, bor, węgiel, azot i krzem. Materiały polikrystaliczne mają ok. 1000 razy mniejszą wytrzymałość aniżeli materiały o strukturze idealnej. Przyczyną tej różnicy jest występowanie lokalnych defektów budowy krystalicznej, które powodują deformacje plastyczne w wyniku dyslokacji. Deformacje te prowadzą do przedwczesnego niszczenia materiału.

Włókna otrzymane z materiałów kruchych mają znacznie większą wytrzymałość aniżeli materiał bazowy, ponieważ mają mniej pęknięć, a nawet jeśli one występują, są to przeważnie pęknięcia wzdłużne. Wyrażna różnica na korzyść włókien wynika stąd, że struktura krystaliczna włókna jest znacznie doskonalsza, a po drugie - statystyczna liczba defektów sieci krystalicznej we włóknie o znikomo małej objętości jest znacznie mniejsza niż w dużej objętości tego samego materiału. Z tych względów włókna o małej średnicy mają większą wytrzymałość. Większość włókien stosowanych w kompozytach ma średnice w granicach 2-16 μm , [73], [175].

3.4.3. Rodzaje i własności włókien

Podstawowe znaczenie praktyczne mają w tej chwili kompozyty włókniste o osnowach polimerowych (żywice termoplastyczne i termoutwardzalne), zbrojonych włóknami głównie węglowymi, grafitowymi, szklanymi, borowymi i aramidowymi. Decydują o tym ich bardzo dobre parametry techniczne, ale również stosunkowo proste metody wytwarzania i względnie niska cena, [73].

Istotnym wskaźnikiem efektywności włókna są tzw. wytrzymałość właściwa i moduł właściwy (wyrażające się w jednostkach długości), tzn. stosunki odpowiednio wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości do ciężaru właściwego materiału włókna. Im wartości tych wskaźników są większe, tym włókno jest bardziej efektywne.

W zależności od rodzajów włókien ich właściwości fizyczne i mechaniczne są różne. Porównanie parametrów poszczególnych rodzajów włókien - na podstawie [22], [62], [71], [74], [85], [98], [139], [175] - podano w tab. 3.3.

Tab. 3.3. Właściwości różnych rodzajów włókien

Rodzaj włókien		Średnica [μm]	Gęstość [g/cm^3]	Wytrzym. na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie graniczne [%]
Szkłane	E-Glass	10-16	2,5	1900-3500	72-75	1,5-4,0
	S-Glass		2,4	2500-4500	86-87	1,5-4,0
Aramidowe	niskomodułowe	15	1,4	3500-4100	70-120	4,0-5,0
	wysokomodułowe			3500-4000	115-200	1,8-3,5
Węglowe	wysokiej wytrzymałości	5-12	1,7-1,9	2450-4800	165-235	1,1-2,0
	ultrawysokiej wytrzymałości			2500-6000	215-235	1,5-2,3
	wysokomodułowe			1800	350-450	0,5-0,9
	ultrawysoko- modułowe			1000-1300	450-640	0,2-0,4
Grafitowe		7-8	1,4-2,0	1700-2800	230-400	
Boron		100-200	2,5	3400-3500	400-410	--
Poliester		--	--	2000-3000	12-15	--

Do wzmocniania konstrukcji inżynierskich najczęściej stosowane są następujące kompozyty:

- zbrojone włóknami węglowymi (CFRP - Carbon Fibre Reinforced Plastics),
- zbrojone włóknami szklanymi (GFRP - Glass Fibre Reinforced Plastics),
- zbrojone włóknami aramidowymi (AFRP - Aramid Fibre Reinforced Plastics).

Wartości wytrzymałości na rozciąganie wyżej wymienionych kompozytów są znacznie wyższe aniżeli stali, zaś moduł Younga w przypadku CFRP porównywalny - porównanie tych cech podano w tab. 3.4, [85]. Ponadto należy podkreślić fakt, że stal ze względu na dużą przewodność elektryczną łatwo ulega korozji, [42].

Tab. 3.4. Porównanie właściwości mechanicznych stali i kompozytów, [85]

	Stal	AFRP	CFRP	GFRP
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	300-450	1720-2540	600-3690	480-1600
Moduł Younga, GPa	200	41-125	120-580	35-51

Ponieważ włókna szklane posiadają słabą odporność na środowiska alkaliczne oraz niższą wytrzymałość zmęczeniową, a włókna aramidowe mają znacznie niższy moduł sprężystości niż włókna węglowe, to właśnie materiały CFRP są zalecane do wzmocniania konstrukcji poddanych obciążeniom zmęczeniowym, [58], [59].

Włókna szklane są najstarszymi, najtańszymi i najczęściej stosowanymi włóknami używanymi do zbrojenia kompozytów. Istnieją dwa podstawowe typy włókien szklanych - E i S. Pierwszy z nich ma gorsze własności mechaniczne (sprężyste, wytrzymałościowe, zmęczeniowe, udarowościowe, termiczne, reologiczne), ale znacznie niższą cenę niż typ S. Stąd, nadal, znacznie częściej stosuje się włókna typu E. Inne, mniej popularne typy włókien szklanych to C, R, T, [9]. Włókna szklane są niepalne i zachowują swoje cechy fizyczne i chemiczne w wysokich temperaturach. Nie absorbują wody i jest to jedna z przyczyn ich dużej odporności chemicznej.

Włókna organiczne, takie jak bawełna, juta i sizal wykorzystywane są do zbrojenia kompozytów od dawna, [9]. Zakres ich stosowania był jednak bardzo ograniczony ze względu na bardzo niskie parametry mechaniczne. Dopiero pojawienie się włókien aramidowych spowodowało ich szerokie wykorzystywanie w produkcji lotniczej, samochodowej, a przede wszystkim sprzętu sportowego (narty, łodzie wyczynowe, sprzęt golfowy). Nazwy handlowe tych włókien to *Nomex*, *Kevlar*, *Kevlar 29* i *Kevlar 49*. Włókna aramidowe są, generalnie rzecz biorąc, najlepsze pod względem własności mechanicznych, ale jednocześnie najdroższe. Z tego powodu są one często używane łącznie z włóknami grafitowymi lub szklanymi typu E, tak aby uzyskać kompromis między parametrami mechanicznymi i rozsądną ceną, [73]. Włókna aramidowe nie nadają się do zbrojenia elementów ściskanych, gdyż ich wytrzymałość na ściskanie jest sześć razy mniejsza aniżeli wytrzymałość na rozciąganie, [129].

Włókna węglowe są również włóknami grafitowymi, ale o słabiej uporządkowanej strukturze. Większością parametrów przewyższają włókna szklane, są jednak od nich znacznie droższe. Obok obszarów o strukturze właściwej dla krystalicznego grafitu, występują obszary o zaburzonej sieci krystalicznej, a nawet obszary całkowicie jej pozbawione. Produkowane przemysłowo włókna węglowe znane są w handlu pod nazwami firmowymi: *Modmor*, *Grafil*, *Hyfil*, *Torayca*. Głównymi producentami włókien węglowych są: Japonia, USA, Anglia, Francja, Niemcy.

Pod względem wartości modułu sprężystości włókna węglowe dzieli się na następujące grupy, [17]:

- ultra wysoki moduł, typ UHM (moduł >450GPa),
- wysoki moduł, typ HM (moduł pomiędzy 350-450 GPa),
- średni moduł, typ IM (moduł pomiędzy 200-350 GPa),
- niski moduł i wysoka rozciągliwość, typ HT (moduł <100 GPa, wytrzymałość na rozciąganie > 3,0 GPa),
- bardzo wysoka rozciągliwość, typ SHT (wytrzymałość na rozciąganie >4,5 GPa)

Problemem jest niezyskiwanie przez kompozyty z włóknami węglowymi spodziewanych wartości wytrzymałości w próbie ściskania. Stwierdzono, że kompozyty z włóknami węglowymi są słabsze w próbie ściskania osiowego nawet od kompozytów umocnionych włóknami szklanymi, [139].

3.4.4. Typy i własności osnów

Osnowa pełni w kompozycie rolę spoiwa dla włókien, umożliwiając powiązanie włókien w elementy powierzchniowe, stanowiące podstawę do wytwarzania elementów konstrukcyjnych. Osnowa stanowi także powłokę ochronną włókien. W pewnym stopniu uczestniczy ona również w przenoszeniu obciążeń. Zasadniczo jednak osnowa ma mały

wpływ na charakterystyki sztywnościowe i wytrzymałościowe kompozytu. W stosunku do włókien - moduły sprężystości, jak i wytrzymałość na rozciąganie matrycy są mniejsze o mniej więcej dwa rzędy wielkości. Podstawowe matryce to żywice termoutwardzalne i żywice termoplastyczne. Źródłem takiego podziału są różne procesy chemiczne i technologiczne, w wyniku których uzyskuje się żywice. Rzutuują one głównie na własności użytkowe, związane z właściwościami fizyko-chemicznymi żywic, takimi jak - odporność na media agresywne (w tym także wodę), nie mają natomiast większego wpływu na gęstości, moduły sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie.

Tym, co odróżnia żywice termoplastyczne od termoutwardzalnych w obrazie makroskopowym jest ich zachowanie przy ogrzewaniu i chłodzeniu. Tworzywa termoplastyczne poddane ogrzewaniu mięknią, a chłodzone twardnieją. Proces ten jest w pełni odwracalny i powtarzalny w zakresie temperatur ograniczonym temperaturą topnienia. Tworzywa termoutwardzalne poddane ogrzewaniu ulegają trwałemu utwardzeniu i kolejne cykle „ogrzewanie-chłodzenie” nie powodują ani ich mięknięcia, ani powtórnego twardnienia. Są one twardsze i bardziej wytrzymałe, chociaż także bardziej kruche niż tworzywa termoplastyczne. Ważną ich zaletą z punktu widzenia zastosowań jest stabilność narzuconego, początkowego kształtu. Najczęściej stosowaną w kompozytach żywicą jest, należąca do grupy tworzyw termoutwardzalnych, żywica epoksydowa, występująca pod wieloma nazwami handlowymi, np. *Narmco 2387*, *Vicotex 171-174* i in. Często stosowane są również, głównie z powodu niższej ceny żywice poliestrowe - np. *Polimal 109*, [73].

Dzięki możliwości budowy materiału o własnościach anizotropowych istnieje możliwość dostosowania wartości wytrzymałości oraz kierunków anizotropii do stanu naprężenia w materiale. Pozwala to konstruować materiały w sposób optymalny pod względem wytrzymałościowym.

Istotną wadą materiałów kompozytowych jest wrażliwość własności mechanicznych na podwyższone temperatury. Obserwuje się szczególnie to w przypadku obciążenia kompozytu w kierunku innym niż kierunek ułożenia włókien. Właściwie nie ma to jednak znaczenia przy wzmocnianiu konstrukcji kompozytami jednokierunkowo zbrojonymi, [55]. Należy równie zwrócić uwagę na konieczność ochrony przeciwpożarowej i ochrony przeciw promieniowaniu ultrafioletowemu oraz (jak dotychczas) stosunkowo wysokie koszty, [163].

3.5. BADANIA LABORATORYJNE ELEMENTÓW WZMOCNIONYCH PRZY UŻYCIU FRP

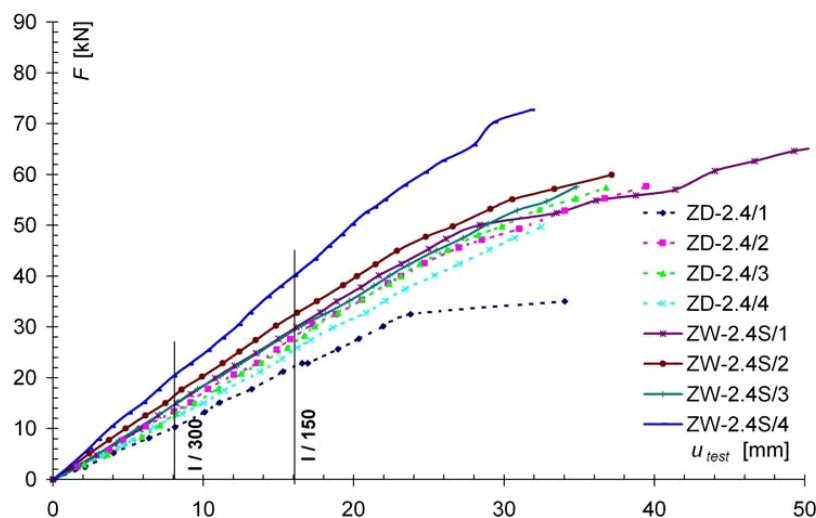
Dopiero w latach dziewięćdziesiątych XX. wieku przeprowadzono pierwsze badania z zastosowaniem taśm węglowych do wzmocniania elementów drewnianych. Proponowane sposoby wzmocniania, z reguły, nie były jednak do zaakceptowania w konstrukcjach zabytkowych. Taśmy zazwyczaj były doklejane od spodu, jak w konstrukcjach betonowych, [246].

Duży program badawczy, obejmujący badania elementów zginanych, ściskanych oraz rozciąganych wzmocnionych włóknami węglowymi, został zrealizowany w Politechnice Śląskiej, [30], [31], [32], [33], [34], [35]. Badania skuteczności wzmocnień taśmami z włókien węglowych (zastosowano taśmy Sika CarboDur S512 i H514 doklejone do spodu belki) zginanych elementów belkowych drewnianych zrealizowano w trzech różnych grupach:

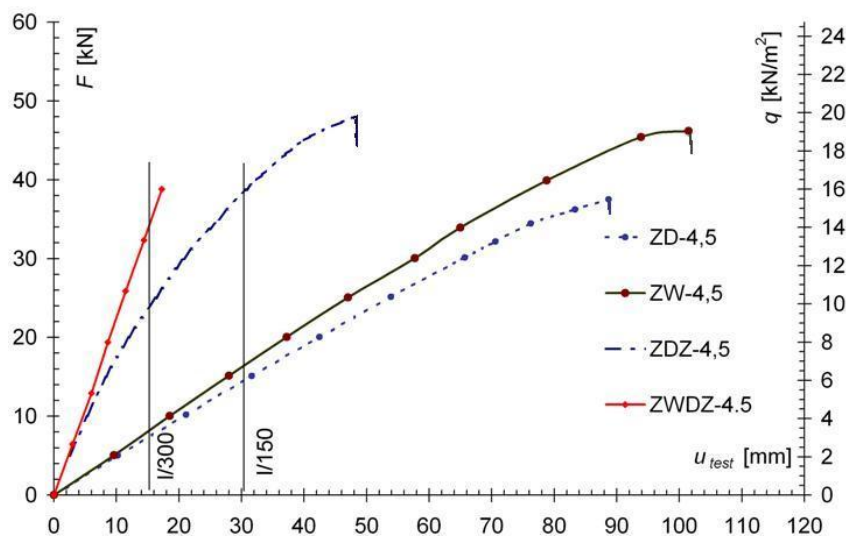
- grupa I - modele belek o wymiarach 120×160×2400 mm, o rozstawie podpór 2400mm,

- grupa II - modele belek o wymiarach 140×180×5000 mm, o rozstawie podpór 4500 mm,
- grupa III - wzmocnione stropy zespolone drewniano-żelbetowe, wykonane z belek drewnianych o wymiarach 140×180×5000 mm oraz płyty żelbetowej grubości 60 mm i szerokości 1500 mm. Rozstaw podpór - 4500 mm.

Dla belek grupy I wzmocnionych taśmą CFRP o module sprężystości 173 GPa i przekroju 50×1,2 mm (procent zbrojenia $\mu = 0,31\%$) stwierdzono średni wzrost nośności o 28%, a średni wzrost sztywności o 20% - zależność „siła-ugięcie” przedstawiono na rys. 3.8. Prawie takie same wyniki średnie uzyskano dla analogicznego rozwiązania z zastosowaniem taśmy o module sprężystości 300 GPa i przekroju 50×1,4 mm (procent zbrojenia $\mu = 0,36\%$). Maksymalny wzrost nośności belek wzmocnionych taśmą CFRP o module sprężystości 300 GPa wynosił 142% w stosunku do najwyższej nośności modelu nie wzmocnionego. Podobne wyniki uzyskano dla belek grupy II.



Rys. 3.8. Ścieżki równowagi dla belek grupy I, [30]
 ZD-2.4 - belki świadkowe; ZW-2.4S - belki wzmocnione taśmą typu S

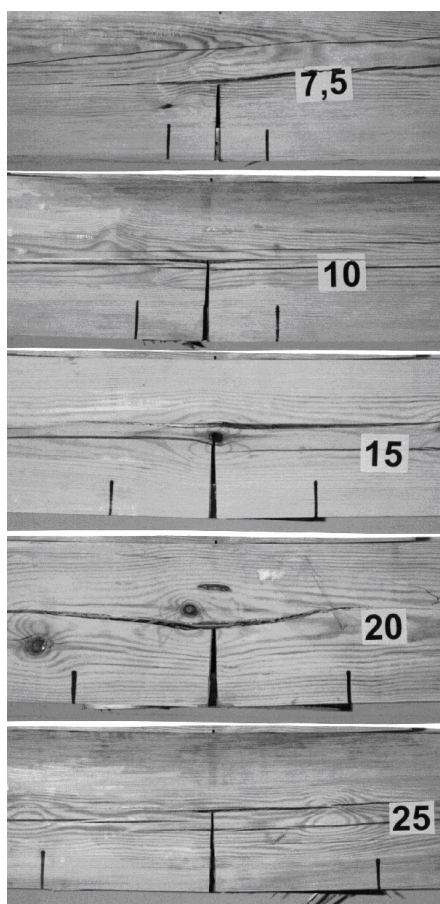


Rys. 3.9. Porównanie sztywności modeli, [30]
 ZD-4.5 - belka niewzmocniona; ZW-4.5 - belka wzmocniona taśmą; ZDZ-4.5 - belki w stropie zespolonym,
 ZDZ-4.5 - belki wzmocnione taśmą w stropie zespolonym

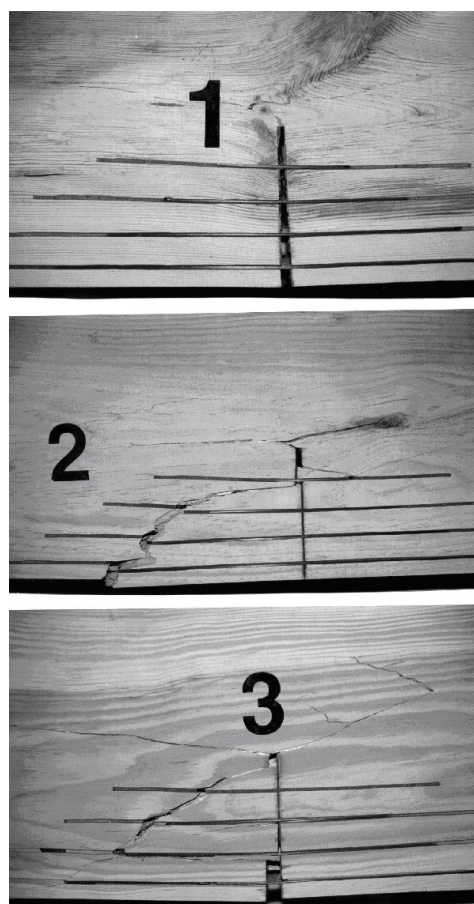
Stwierdzono, że wykonanie wzmocnienia poprzez przyklejenie taśmy z włókien węglowych w strefie włókien rozciąganych drewna zdecydowanie zmieniło postać zniszczenia. Taśma skutecznie zapobiegała zerwaniu dolnych włókien drewna. Pierwsze oznaki niszczenia elementów wzmocnionych następowały w pierwszej kolejności w górnej części elementu, gdzie zachodziło uplastycznienie strefy ściskanej.

Wykonanie wzmocnienia poprzez zespolenie z płytą żelbetową o grubości 0,06 m (grupa III), za pomocą łączników rurowych, powodowało wzrost sztywności ponad 270%. Wykonanie dodatkowego wzmocnienia w stropie zespolonym, poprzez doklejenie pojedynczej taśmy Sika Carbodur S512 zwiększało sztywność o kolejne 130%, czyli ponad czterokrotnie w stosunku do belki drewnianej, natomiast w stosunku do elementów zespolonych ZDZ-4,5 wzrost ten wyniósł 46% - rys. 3.9, [30].

Koncepcję odtworzenia nośności osłabionej strefy rozciąganej (osłabienie modelowano za pomocą rozcięcia włókien rozciąganych prostopadle do osi belki) przedstawiono w dwóch układach z taśmami wklejonymi pionowo (rys. 3.43) i poziomo (rys. 3.44), [144], [206], [208]. Badane belki, o rozpiętości w świetle podpór 2,7 m, poddano próbie trójpunktowego zginania. Jednocześnie podjęto próbę optymalizacji długości zakotwienia połączenia „taśma-drewno” - rozdz. 3.5.4. W przypadku badanych belek można uznać, że wzmocnienie osłabionej strefy rozciąganej pozwoliło na odtworzenie nośności belek na zginanie. Uzyskane w badaniach obrazy zniszczeń pokazano na rys. 3.10 i 3.11. Dodatkowo w [24] przedstawiono wyniki analizy numerycznej badanych belek, z zastosowaniem kryterium wytrzymałościowego Hilla.

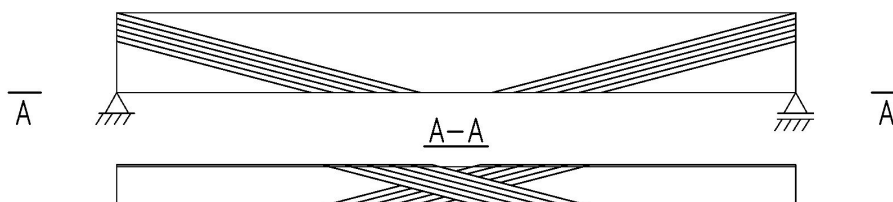


Rys. 3.10. Uzyskane w badaniach obrazy zniszczeń (taśmy wklejone pionowo), [144]



Rys. 3.11. Uzyskane w badaniach obrazy zniszczeń (taśmy wklejone poziomo), [208]

W Politechnice Szczecińskiej pod kierunkiem Z. Mielczarka i R. Orłowicza podjęto próbę zastosowania mat oraz taśm CFRP do wzmocnienia spękanych stref przypodporowych belek i osłabionych obszarów przęsłowych, [162]. Zaproponowano wzmocnienie belek za pomocą ciągłego zbrojenia na długości belki. Zbrojenie wykonano za pomocą dwóch pasm z mat węglowych, które obustronnie obejmują belkę, krzyżując się w środku rozpiętości na spodzie belki. Schemat wzmocnienia przedstawiono na rys. 3.12. Badania wykonano na belkach, o wymiarach przekroju 43×190 mm i rozstawie podpór 1,8 m, które w strefie obojętnej miały spękania spowodowane skurczem przy wysychaniu. Początek niszczenia zbrojonych belek następował wskutek wyczerpania nośności strefy ściskanej. Jednocześnie przy podporach obserwowano wzajemne przesunięcie się górnej i dolnej części belki. Wskutek tego maty węglowe uległy rozerwaniu na powierzchniach dolnych. Z kolei zmniejszenie ramienia sił doprowadziło do rozerwania odcinków mat, stanowiących zbrojenie dolnej, rozciąganej części belki. Siła niszcząca belkę wzrosła prawie dwukrotnie podczas gdy sztywność wzrosła jedynie nieznacznie. Zaproponowana metoda wzmocnienia pozwoliła nie tylko na odtworzenie pierwotnej nośności, ale znaczne zwiększenie nośności belki.

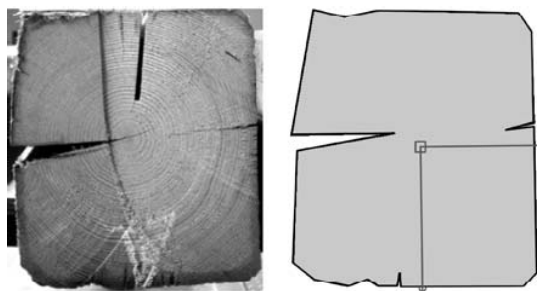


Rys. 3.12. Schemat ciągłego zbrojenia strefy rozciąganej i strefy przypodporowej belki drewnianej, [162]

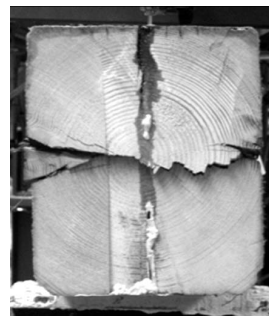
W [214] i [215] przedstawiono sposób wzmocnienia, za pomocą taśm węglowych S&P 150/2000, litych belek drewnianych z naturalnymi defektami, które znacząco obniżają sztywność elementu, rys. 3.13.

Proces wysychania i towarzyszący mu skurcz prowadzi do tworzenia się spękań drewna. W trakcie wysychania powierzchniowe warstwy drewna tracą wilgotność i ulegają skurczowi szybciej niż wewnętrzne partie drewna. Podłużne pęknięcia drewna mogą wystąpić w pobliżu środka większego wymiaru przekroju (około osi obojętnej przekroju) jako wynik nierównomiernego wysychania. Pęknięcia te znacząco redukują jeden z istotnych parametrów wytrzymałościowych drewna - wytrzymałość na ścinanie. Zjawisko to jest bardziej charakterystyczne dla elementów o większych przekrojach poprzecznych, [159].

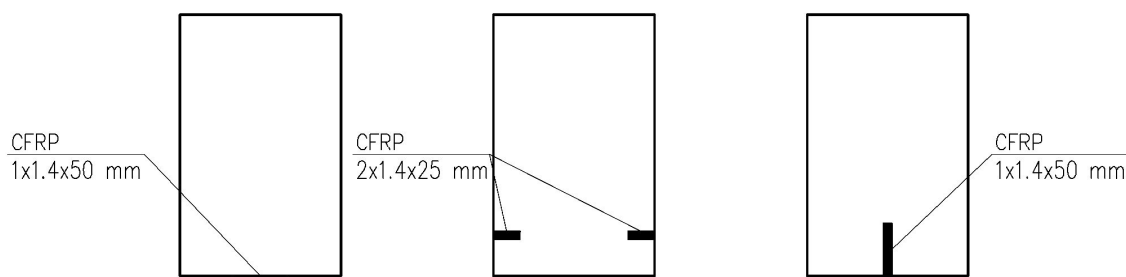
Belki, o rozpiętości w osiach podpór 3,25 m, zostały wzmocnione taśmami w sposób pokazany na rys. 3.15. Ukrycie taśm wewnątrz przekroju sprawia, że ten sposób wzmocnienia jest do zaakceptowania we wzmocnianiu starych, zabytkowych konstrukcji drewnianych. Sztywność wzrosła tu średnio o 5,86% w stosunku do belek niewzmocnionych. Wklejenie taśm ograniczyło powiększanie się pęknięć w drewnie. Zniszczenie, w większości badanych przypadków, nastąpiło na skutek naprężeń ścinających w środkowym przekroju belki, w miejscu występowania spękania skurczowego, rys. 3.14. Autorzy sygnalizują, że konieczne są dalsze badania z dodatkowym wzmocnieniem na ścinanie wzdłuż włókien. Metody wzmocniania belek drewnianych z podłużnymi spękaniem, m.in. za pomocą materiałów FRP przedstawiono w [6].



Rys. 3.13. Typowy przekrój belki z pęknięciami skurczowymi, [214], [215]



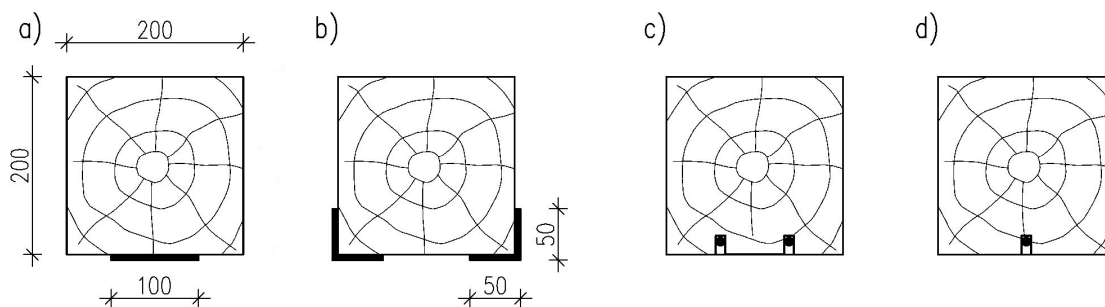
Rys. 3.14. Postać zniszczenia belki, [215]



Rys. 3.15. Sposób wzmocnienia litych belek drewnianych taśmami CFRP, [214], [215]

Wyniki eksperymentu dużego programu badawczego, obejmującego 20 litych belek drewnianych wzmocnionych taśmami i prętami CFRP, zaprezentowano w [26], [27], [28], [29]. Belki o długości 4000 mm (3600 mm - osiowy rozstaw podpór) i przekrojach pokazanych na rys. 3.16 zostały poddane próbie czteropunktowego zginania.

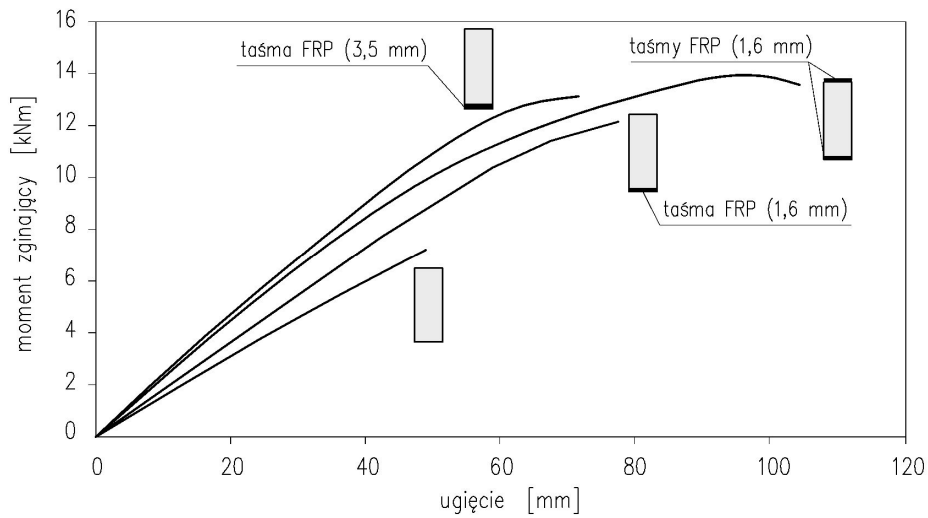
Nośność belki z 3 doklejonymi taśmami w sposób pokazany na rys. 3.16 a) wzrosła o ok. 60% (przy wzroście sztywności ok. 29%), a belki pokazanej na rys. 3.16 b) ok. 55% (przy wzroście sztywności ok. 30%) w stosunku do belki niewzmocnionej. Procent zbrojenia wynosił odpowiednio 0,123% i 0,082%. Nośność belek wzmocnionych prętami CFRP - rys. 3.16 c), 3.16 d) - wzrosła odpowiednio o ok. 52% i 29% zaś sztywność o 25% i 22%. W badaniach podjęto również próbę wstępnego sprężenia zarówno taśm jak i prętów w opisanych modelach.



Rys. 3.16. Lite belki drewniane wzmocnione taśmami a), b) i prętami CFRP c), d), [28]

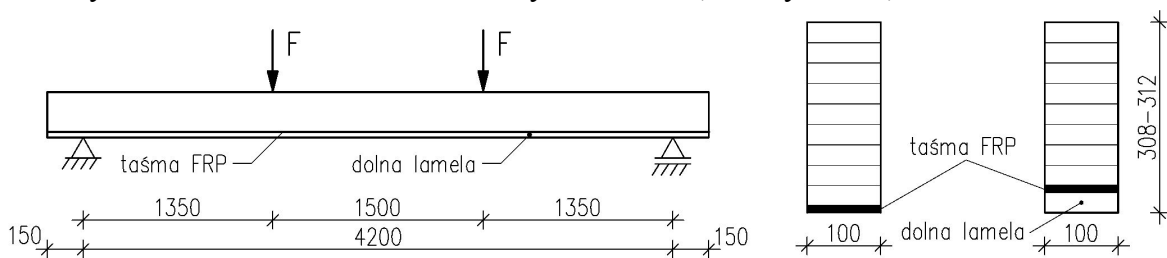
W [80] zaprezentowano wyniki badań wzmocnianych belek, z litego sosnowego drewna, taśmami AFRP. Badania zostały przeprowadzone na belkach drewnianych o wymiarach 140×45×2500 mm. Taśmy AFRP, o grubościach 1,6 mm i 3,5 mm, zostały doklejone w strefie rozciąganej oraz w strefie rozciąganej i ściskanej belek w sposób pokazany na rys. 3.17. Sztywność belki - przy stopniu zbrojenia 0,5% - wzrosła o 20% w przypadku doklejenia taśm jedynie w strefie rozciąganej oraz o 40% ze zbrojeniem doklejonym w obydwu strefach. Sztywność belki przy 1,5% zbrojeniu strefy rozciąganej

wzrosła o 60%. Zanotowano ponadto wzrost nośności powyżej 100%. Doklejenie taśm FRP miało wpływ na ujednoczenie struktury badanych elementów - redukcja współczynnika zmienności o 35%. Ci sami autorzy podjęli także próbę wzmocniania płyt LVL materiałami kompozytowymi AFRP.



Rys. 3.17. Zależność „ugięcie - moment zginający” w środku rozpiętości badanych belek, [80]

Badania belek z drewna klejonego warstwowo z wklejonym pomiędzy lamele zbrojeniem CFRP i AFRP opisuje Blass w [17], [18], [19], [20]. Wymiary badanych elementów (8 różnych modeli po 5 sztuk w serii) pokazano na rys. 3.18. Do wzmocnienia zastosowano taśmy węglowe: S&P Lamelle i Sika Carbodur oraz taśmy aramidowe firmy Akzo Nobel Faser AG. Zastosowano kleje na bazie żywicy epoksydowej. Zniszczenie, w większości badanych elementów, następowało w strefie rozciąganej. Przykładowe obrazy zniszczeń przedstawiono na rys. 3.18, 3.19. Belki zbrojone taśmami przenosiły nadal obciążenie po pojawieniu się pierwszych oznak zniszczenia drewna. Uzyskano znaczące wzrosty nośności - do ok. 100 % oraz sztywności - do, maksymalnie, ok. 40%.



Rys. 3.18. Schemat statyczny i przekroje poprzeczne badanych belek wzmocnionych taśmami FRP, [18]

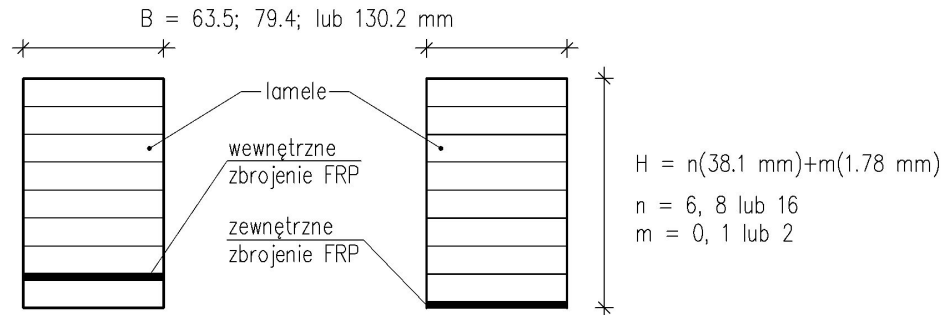


Rys. 3.19. Postać zniszczenia belki z wklejonym zbrojeniem CFRP pod ostatnią lamelą, [18]



Rys. 3.20. Postać zniszczenia belki z taśmą doklejoną do spodu belki, [13]

W [153] przedstawiono badania odporności ogniowej belek z drewna klejonego warstwowo wzmocnianych, w fazie produkcji, taśmami CARP, ARP, GARP, umieszczonymi poziomo. Długości belek wynosiły 3,66m (12ft); 4,27m (14ft); 5,49m (18ft). Wymiary przekroju poprzecznego pokazano na rys. 3.21. Belki zostały poddane działaniu ognia przy użyciu dwunastu symetrycznie rozmieszczonych palników gazowych, wg ASTM E 119-88 „Standard Test Methods for Fire Test of Building Constructions Materials”. Umieszczenie taśm wewnątrz przekroju zwiększyło odporność ogniową badanych belek podczas badania o 44% w stosunku do belek wzmocnionych zbrojeniem zewnętrznym. Stwierdzono, że na wyniki właściwie nie miał wpływu rodzaj zastosowanego zbrojenia (CFRP, ARP, GARP).



Rys. 3.21 Przekrój pionowy belek poddanych próbie ogniowej, [153]

W badaniach opisanych w [176] próbie ogniowej poddano również belki z drewna klejonego warstwowo. Belki obciążone siłą równą $2/3$ siły niszczącej poddane były działaniu temperatury 800°C . Wyniki badań wskazują, że zachowanie belek zbrojonych materiałami CFRP, w sytuacjach pożarowych, jest korzystniejsze aniżeli konwencjonalnych belek bez zbrojenia lub belek ze zbrojeniem w postaci wkładek stalowych.

Porównanie wkładek wzmocniających w postaci płaskowników stalowych oraz taśm CFRP do zbrojenia belek z drewna klejonego warstwowo przedstawiono w [99]. Poza uzyskaniem wyższych nośności w przypadku zbrojenia CFRP zwrócono również uwagę na większą kompatybilność materiałów FRP z drewnem - zbliżoną rozszerzalność termiczną.

Opis podobnych badań dotyczących wzmocniania belek z drewna klejonego warstwowo można znaleźć ponadto m. in. w [14], [21], [218], [228], [234].

W literaturze przedmiotu w zasadzie nie są opisane badania długotrwałe belek z drewna klejonego wzmocnionych FRP. Przedstawione w [51], [54] badania zmęczeniowe wykazały niewielką różnicę pomiędzy belkami klejonymi warstwowo niewzmocnionymi i wzmocnionymi przy użyciu GFRP. W Polsce pierwsze próby badań zmęczeniowych stropu zespolonego drewniano - żelbetowego wzmocnionego taśmami CFRP podjęte zostały na Politechnice Śląskiej, [30]. Po 156 dniach w modelach pod obciążeniem długotrwałym równomiernie rozłożonym przyjęto, iż nie nastąpiło przemieszczenie taśmy względem drewna na całej długości połączenia.

W [96] pokazano przykład zastosowania materiałów FRP do wzmocniania drewnianych podkładów kolejowych. Zwrócono uwagę na utrudnioną penetrację kleju ze względu na wiek i sposób eksploatacji drewna - duże wgnioty.

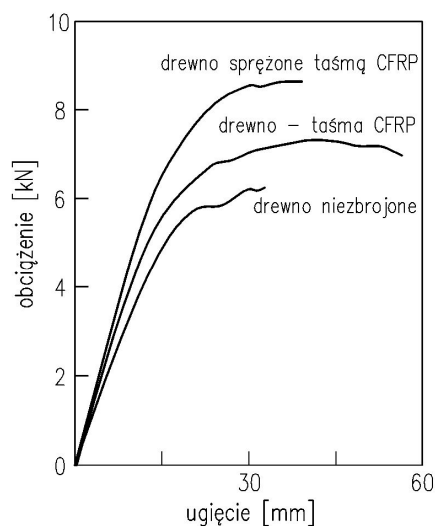
Sprężone taśmy kompozytowe z włóknami węglowymi (CFRP) otwierają nowe możliwości wzmocniania istniejących konstrukcji. Dzięki sprężeniu przyklejane taśmy CFRP włączają się do przenoszenia obciążeń w konstrukcji już od początkowych faz działania obciążenia oraz powodują redukcję naprężeń w istniejącym przekroju.

Zakotwienia przejmują znaczną część siły rozwarstwiającej i zdecydowanie zmniejszają naprężenia ścinające w spoinie [148], [149].

Dotychczas, przy wzmocnianiu, bardzo duża wytrzymałość na rozciąganie taśm kompozytowych CFRP wykorzystywana była tylko w niewielkim stopniu. Wstępne sprężenie taśm pozwala na znaczne wykorzystanie ich wytrzymałości, a przez to zwiększenie efektywności ekonomicznej wzmocnienia, [67].

Elementem dodatnim efektu sprężania jest wprowadzenie do konstrukcji naprężeń wstępnych ściskających w taki sposób, by w czasie eksploatacji, redukcji ulegały naprężenia rozciągające. Zwiększenie nośności następuje tu przez wprowadzenie stanu naprężeń przeciwnego do spodziewanego w eksploatacji oraz likwidacji wpływu wad drewna w strefie naprężeń rozciągających przez uprzednie sprężenie tych stref. Naturalne wady drewna bardziej obniżają wytrzymałość drewna pracującego na rozciąganie (nawet o 100%) niż na ściskanie, [69].

Pierwsze próby wzmocniania belek drewnianych sprężonymi taśmami węglowymi przeprowadzone zostały w 1992 roku, [232]. Schemat wzmocnienia przedstawiono na rys. 3.5.1 (rozdz. 3.8). Program badawczy obejmował testy nośności w próbie trójpunktowego zginania, belek o wymiarach 45×40×800 mm: bez zbrojenia, zbrojonych taśmą kompozytowa bez wstępnego sprężenia, zbrojonych taśmą kompozytowa sprężoną - 620 MPa. Spoina wykonana została z żywicy epoksydowej z wypełnieniem z mączki kwarcowej, by zmniejszyć skurcz oraz zredukować koszty. W celu zminimalizowania efektu lokalnej koncentracji naprężeń oraz wpływu naprężeń poprzecznych przy końcach taśm, doklejono (w prasie hydraulicznej) dodatkowo dwie pary stalowych blach o stopniowo malejącej grubości. Przed zabiegiem blachy piaskowano, a taśmy CFRP szlifowano drobnoziarnistym papierem ściernym. Długość połączeń wynosiła 100 mm. Taśmy zostały napięte za pomocą siłownika hydraulicznego. Stopień zbrojenia wzmocnionych belek wynosił 2,5% - taśmy o wymiarach przekroju 1×30 mm. Belki obciążano aż do zniszczenia. Badania jednoznacznie wskazują na zasadność takiego rozwiązania - uzyskano znaczący wzrost nośności i sztywności (rys. 3.22).



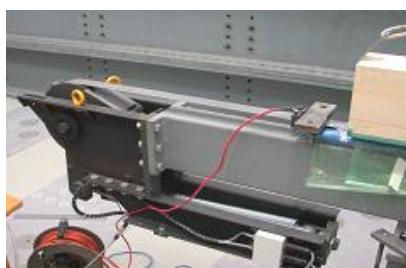
Rys. 3.22. Zależność „ugięcie - obciążenie” dla belek z drewna niezbrojonego, zbrojonego i sprężonego, [232]

Podobne badania ze sprężonymi taśmami CFRP opisane zostały w [37]. Eksperyment przeprowadzono na 18 belkach: 6 świadkowych, 6 wzmocnionych niesprężoną taśmą i 6 wzmocnionych sprężoną taśmą (siła sprężająca - 60 kN). Urządzenie do sprężania taśm pokazano na rys. 3.23. Do wzmocnienia zastosowano taśmę S&P CFK 150/2000. Badane belki z drewna klejonego warstwowo GL 32 o wymiarach

200×140×4000 mm poddano próbie czteropunktowego zginania aż do zniszczenia. Średnie wyniki z przeprowadzonych prób dla poszczególnych serii zestawiono w tab. 3.5. Stwierdzono, że efekt wzmocnienia jest niezadowalający ze względu na zbyt małą siłę sprężającą taśmę. Podczas badań nie zaobserwowano delaminacji połączenia „taśma-drewno”. Typowy obraz zniszczenia belki z drewna klejonego warstwowo wzmocnionej sprężoną taśmą FRP przedstawiono na rys. 3.24.

Tab. 3.5. Sztywność belek i maksymalne momenty zginające uzyskane w badaniach, [37]

	Sztywność belki EI [kN·m ²]	Maks. moment zginający M_{max} [kNm]
Belka świadkowa	1200	41
Belka wzmocniona taśmą CFRP	1430	50
Belka wzmocniona sprężoną taśmą CFRP	1460	55



Rys. 3.23. Zastosowane w badaniach urządzenie (bloki kotwiące) do sprężania taśm, [37]



Rys. 3.24. Przykładowy obraz zniszczenia belki wzmocnionej sprężoną taśmą CFRP, [37]

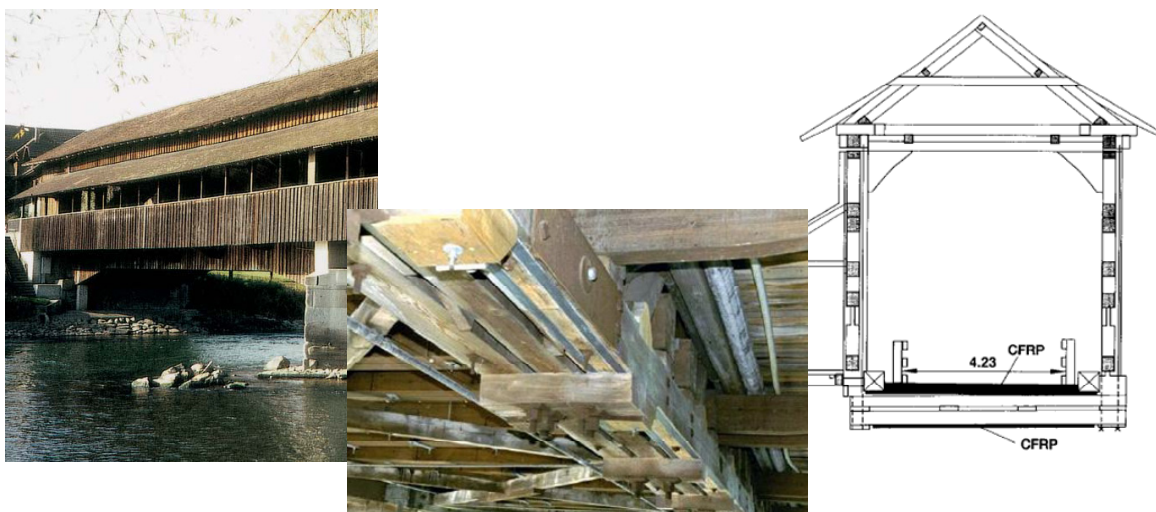
Materiały FRP mogą służyć również wzmocnieniu belek na ścinanie. W [231], [232] wzmocniono strefy przypodporowe poprzez doklejenie laminatów FRP do powierzchni bocznych belek drewnianych. Przegląd stosowanych metod wzmocniania stref ścinanych przy użyciu materiałów FRP zamieszczono w [9].

Istotnym zagadnieniem, wymagającym dalszych prac, jest analiza pracy połączenia materiałów kompozytowych z drewnem. Badaniem wytrzymałości połączenia „taśma CFRP - drewno” zajęto się m.in. w laboratorium Szwajcarskiego Instytutu Materiałów Budowlanych - EMPA, [93].

3.6. WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ MATERIAŁÓW FRP DO WZMACNIANIA KONSTRUKCJI DREWNIANYCH

Przykładów zastosowań taśm węglowych CFRP do wzmocnienia konstrukcji drewnianych nadal nie ma zbyt wiele. Wzmocnianie konstrukcji drewnianych przy użyciu taśm węglowych jest zagadnieniem stosunkowo nowym i słabo rozpoznanym, w odróżnieniu od wzmocniania konstrukcji betonowych, gdzie istnieje wiele przykładów zastosowania omawianych taśm, również w Polsce. Główne założenia, możliwości aplikacyjne, wskazówki i problemy dotyczące zastosowania materiałów FRP w konstrukcjach betonowych w wyczerpujący sposób opisane są m.in. w [168].

Po raz pierwszy zastosowano CFRP w konstrukcji drewnianej w 1991 roku do wzmocnienia zabytkowego, wybudowanego w 1807 roku, drewnianego mostu w pobliżu Sins w Szwajcarii (rys. 3.25), [49], [135], [156], [158]. Pierwotnie most, o rozpiętości przęsła 35 m, został zaprojektowany do przeprawy pojazdów konnych. Obecnie dopuszczalne obciążenie wynosi 20 ton.



Rys. 3.25. Most w Sins nad rzeką Reuss w Szwajcarii, [156], [158]

Pochodną dalszych badań nad zastosowaniem taśm węglowych CFRP w Szwajcarskim Instytucie Materiałów Budowlanych - EMPA była realizacja kolejnego wzmocnienia drewnianego zabytkowego mostu w Murgenthal nad rzeką Aare, w 1998 roku. Dwuprzęsłowy most o rozpiętości przęsła ok. 50 m został wzmocniony poprzez doklejenie taśm CFRP w sposób przedstawiony na rys. 3.26, [224], [225], [226].



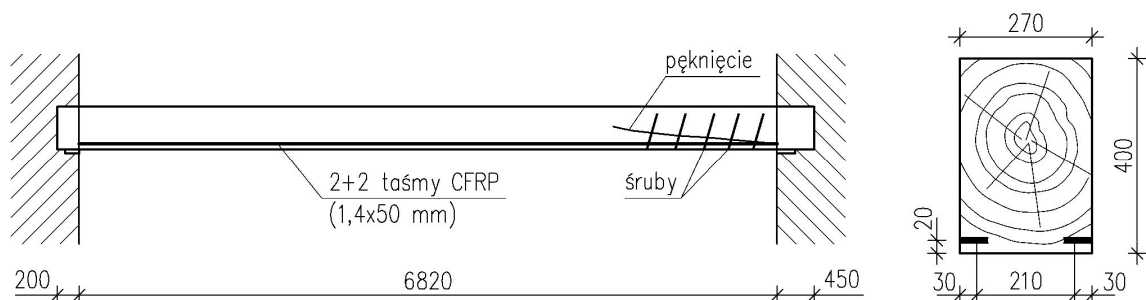
Rys. 3.26. Most w Murgenthal nad rzeką Aare w Szwajcarii, [224], [225], [226]



Rys. 3.27. Wzmocniony, opaską z maty CFRP, słup drewniany w obiekcie zabytkowym (Szwajcaria), [224]

Inne przykłady wzmocnień belek drewnianych w obiektach zabytkowych w Szwajcarii przedstawiono w [155]. Pierwszy z nich dotyczy wzmocnienia belek stropowych muzeum w Lucernie, a drugi klasztoru w Eschenbach. Nie tylko zginane belki naprawiane są bądź wzmocniane za pomocą materiałów CFRP, ale również słupy. Na rys. 3.27 przedstawiono wzmocnienie drewnianego słupa w obiekcie zabytkowym za pomocą opaski z maty CFRP.

Interesującym rozwiązaniem, pod względem konserwatorskim, jest wzmocnienie belki stropowej, wklejonym do wnętrza przekroju, zbrojeniem CFRP (o module sprężystości 170 GPa) w pałacu Nobili we Włoszech (2005 r.). Taśmy zostały wklejone przy użyciu kleju tiksotropowego (by zapobiec jego wyciekom) na bazie żywicy epoksydowej. Dzięki temu zabiegowi, w dawnej siedzibie włoskiego banku, można było zdemontować stalowe dwuteowe belki (wprowadzone w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku), które stanowiły wzmocnienie dla drewnianego stropu. Ze względu na pęknięcie belki w strefie przypodporowej wzmocniono ją dodatkowo śrubami wkręcanymi - rys. 3.28. Bogato dekorowany strop drewniany równocześnie został poddany zabiegom renowacyjnym, przede wszystkim usunięto wtórną pobiałę pokrywającą belki - rys. 3.29 i 3.30, [46], [174].



Rys. 3.28. Wzmocniona belka stropowa w pałacu Nobili, [174]

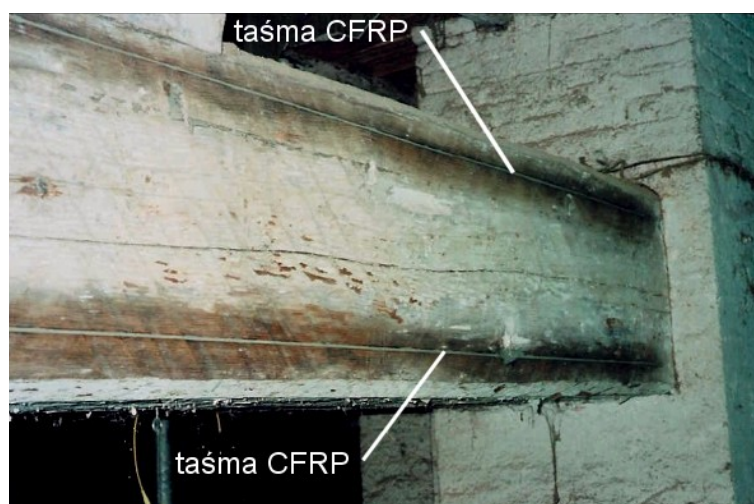


Rys. 3.29. Prace przy wzmocnieniu belek drewnianych w pałacu Nobili (Włochy), [174]



Rys. 3.30. Wzmocnienie belki stropowej w pałacu Nobili (Włochy, 2005), [46]

W 2003 roku dokonano w Trevi (Włochy) wzmocnienia belek stropowych nad zabytkowym, wzniesionym w 1870 magazynem zboża, kiedyś magazynem oliwek - rys. 3.31, [46].



Rys. 3.31. Belka stropowa wzmocniona CFRP w magazynie zboża, Trevi (Włochy), [46]

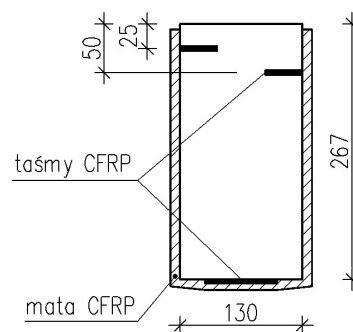
Jednym z kolejnych przykładów wykorzystania materiałów CFRP do wzmocnienia konstrukcji drewnianych jest wzmocnienie 21 belek stropowych nad salą gimnastyczną w gimnazjum Coolidge School District (budynek wzniesiony w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku) w Stanach Zjednoczonych - rys. 3.32, 3.33. Rozważane, alternatywne rozwiązanie w postaci dodatkowych belek z drewna klejonego warstwowo odrzucono ze względu na trudności montażowe oraz koszty. By zwiększyć nośność istniejących belek taśmy umieszczono w sposób pokazany na rys. 3.34. Dodatkowo trzy powierzchnie belek zostały wzmocnione matą CFRP w celu poprawienia współpracy taśmy z przekrojem oraz zwiększenia nośności na ścinanie, [63].



Rys. 3.32. Aplikacja taśmy i maty w budynku gimnazjum Coolidge School District, [63]



Rys. 3.33. Widok wzmocnionej belki, gimnazjum Coolidge School District, [63]



Rys. 3.34. Przekrój poprzeczny wzmocnionej belki, gimnazjum Coolidge School District, [63]

W pracy [157] przedstawiono wykorzystanie włókien węglowych do stężenia konstrukcji gotyckiego kościoła w Miśni, w Niemczech. Stężenie miało na celu ograniczenie przekazywania się poziomych sił z konstrukcji dachu na ściany obiektu. Alternatywne rozwiązanie w postaci prętów stalowych nie zostało zaakceptowane ze względu na zbyt dużą rozszerzalność termiczną stali - oszacowane przemieszczenie końców krokwi wyniosło 12 mm. Ze względu na dużą różnicę temperatur - od -20°C w zimie do $+50^{\circ}\text{C}$ w lecie - nie zdecydowano się również na zastosowanie materiałów GFRP.

O ile ogólnie kompozyty FRP służą do wzmocnienia konstrukcji budowlanych mogą być one również przydatne do innych celów, jak np. wzmocnienie drewnianego masztu typowej holenderskiej łodzi, znanej jako „lemmerhengst”. Przy naprawie uszkodzonego masztu, wykonanego z litego sosnowego drewna, o długość 12 metrów, nie bez znaczenia był ciężar elementów wzmocniających, przede wszystkim, ze względu na konieczność składania masztu przy przepływananiu pod, licznymi w Holandii, mostami. Taśm CFRP o szerokości 15 mm i grubości 1,4 mm zostały wklejone wzdłuż włókien drewna w sposób pokazany na rys. 3.35, 3.36, [8].



Rys. 3.35. Maszt przygotowany do wklejenia taśm CFRP, [8]



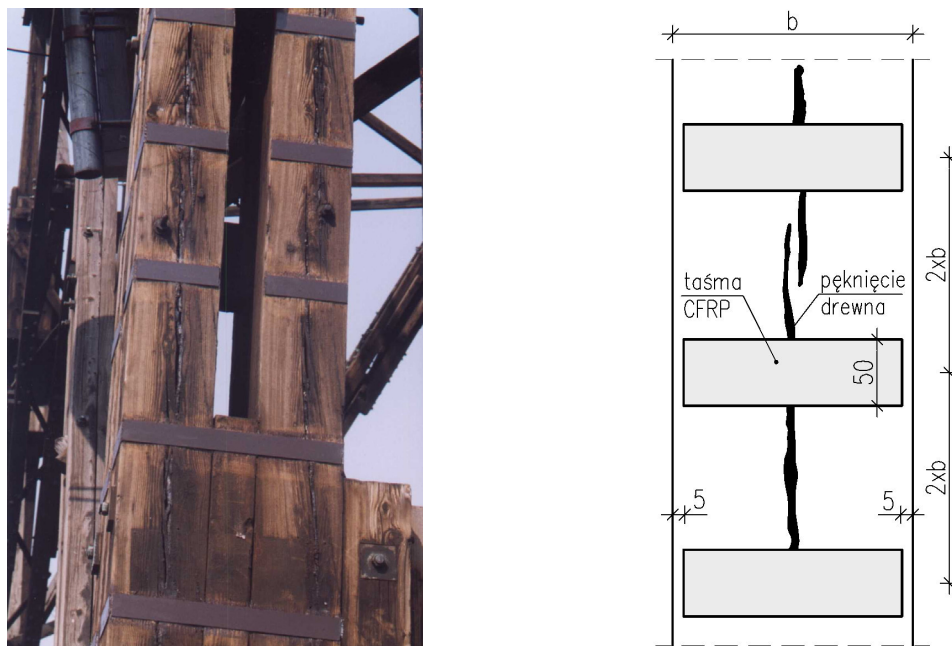
Rys. 3.36. Maszt po wklejeniu taśm CFRP, [8]

Ze względu na coraz niższe koszty materiałów kompozytowych możliwe jest również wzmocnianie elementów konstrukcji obiektów drewnianych pozbawionych wartości historycznych i artystycznych. W 2001 roku w Atenach, w Grecji, wzmocnione zostały krokwie dachu domu wzniesionego w technologii tradycyjnej poprzez doklejenie od spodu taśm CFRP - rys 3.37, [219].



Rys. 3.37. Wzmocnienie krokwi przez doklejenie taśm CFRP, [219]

W Polsce pierwsza próba wzmocnienia konstrukcji drewnianej przy użyciu taśm węglowych miała miejsce w 1998 roku w Gliwicach, gdzie wzmocniono pręty zabytkowej wieży telekomunikacyjnej. Wieża, o wysokości 110,7 m wzniesiona w 1933 roku, ma przestrzenną konstrukcję kratową z drewna modrzewiowego o zmiennym na wysokości rzucie kwadratu. Podczas badań stwierdzono wiele zmian w geometrii węzłów jak też uszkodzenia prętów drewnianych. Powodem wzmocnienia były, przede wszystkim, znaczne pęknięcia wzdłuż włókien drewna. W celu zabezpieczenia elementów ściskanych przed możliwością powiększania się pęknięć oraz w celu niedopuszczenia do rozsegregowania przekroju słupów, co w konsekwencji groziłoby utratą stateczności, zdecydowano się na metodę polegającą na naklejeniu odcinków taśm węglowych (CFRP) prostopadle do osi najbardziej wyężonych prętów drewnianych, zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 3.38. Zalecona metoda naklejania taśm węglowych nie naruszała w sposób zasadniczy estetyki obiektu zabytkowego. Rozważana również koncepcja wzmocnienia poprzez wykonanie metalowych opasek nie uzyskała akceptacji konserwatora zabytków, [2], [3], [4], [5].



Rys. 3.38. Szczegół wzmocnienia prętów drewnianych wieży w Gliwicach doklejonymi odcinkami taśmy CFRP, [2]

W 2004 roku, wzniesiony został obiekt - wiata targowiska w Rudzie Śląskiej - z przekryciem z belek z drewna klejonego warstwowo, które wzmocniono, już na etapie produkcji, taśmami kompozytowymi AFRP. Zastosowany sposób wzmocnienia polegał na wklejeniu taśmy z włóknami aramidowymi pod ostatnią warstwę przekroju z drewna klejonego.

W pierwszej połowie lat dziewięćdziesiątych XX. wieku coraz częściej - ze względu na rozwój technologii, powszechność stosowania oraz koszty - w mostach drewnianych wykorzystywano belki z drewna klejonego warstwowo zbrojone materiałami FRP, [209]. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych w Wielkiej Brytanii stosowanie materiałów FRP było powszechnie akceptowane do wzmocniania mostów betonowych jako alternatywa dla metod tradycyjnych, [146], [147]. Kompozyty zbrojone włóknami aramidowymi są bardziej odporne na wstrząsy, uderzenia aniżeli kompozyty zbrojone włóknami węglowymi czy szklanymi, stąd to właśnie AFRP rekomendowane są w tego typu obiektach, [72].

W Stanach Zjednoczonych po zastosowaniu, od 1993 do 1995 roku, na ponad stu kładkach dla pieszych i mostach przeznaczonych do lekkiego transportu taśm FRP, w sierpniu 1995 skonstruowano dwuprzęsłowy most Lighthouse Bridge nad rzeką Clallam River w stanie Waszyngton o rozpiętości 49,6 m dla ciężkiego transportu przy użyciu taśm CARP (carbon-aramid reinforced plastic). Zastosowano belki z drewna klejonego warstwowo o wymiarach belek 273×1524 mm. Już wtedy analiza kosztów wykazała że koszt tego mostu jest o około 10% niższy niż takiego samego betonowego. Redukcja ugięcia konstrukcji, w stosunku do takiej samej lecz nie wzmocnionej taśmami CARP, wyniosła 95%, [229].

Poniżej przedstawiono kilka przykładów zastosowań materiałów FRP w Stanach Zjednoczonych w latach dziewięćdziesiątych XX. wieku, opianych w [52].

Molo zaprojektowane dla ruchu pieszego w The Bar Harbor Yacht Club (1995) o rozpiętości przeszła 16 m. Dzięki zastosowaniu materiałów FRP udało się zredukować koszty w stosunku do analogicznej konstrukcji stalowej o 25%. Konstrukcja narażona jest na nieustanne działanie soli oraz na duże różnice temperatur od -30° do $+38^{\circ}$ C.

Most The Pattagumpus Bridge (1997) w mieście Medway, Maine USA. Rozpiętość 16 m. Dopuszczalna masa pojazdu 41 ton. Dzielnie przeprowia się przez ten most ok. 3500 różnych pojazdów.

The West Seboeis Stream Bridge (1998), Maine USA. Rozpiętość 12,5 m, dopuszczalna masa pojazdu 78 ton.

W XXI. wieku drewno, jako materiał łatwo pozyskiwany do produkcji elementów GL, łatwo podlegający obróbce, lekki, o stosunkowo wysokiej wytrzymałości poddany odpowiednim opisanym modyfikacjom stanowi, niewątpliwie, alternatywę dla konstrukcji stalowych i żelbetowych, [66].

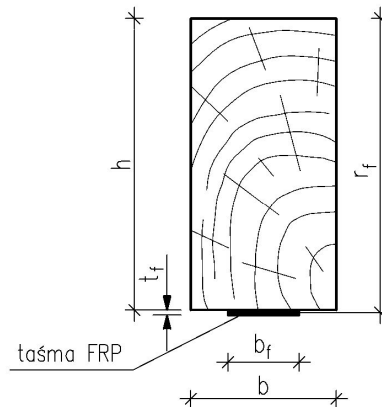
3.7. MODELE SZACOWANIA NOŚNOŚCI BELEK DREWNIANYCH WZMOCNIONYCH PRZY UŻYCIU FRP

3.7.1. Model obliczeniowy według prawa zachowania płaskich przekrojów

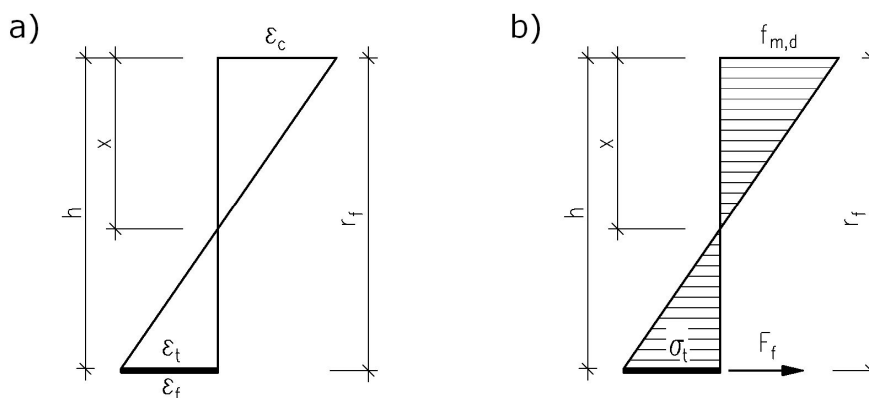
Model obliczeniowy według prawa zachowania płaskich przekrojów zakłada, że:

- przekroje przed obciążeniem jak i po obciążeniu pozostają płaskie,
- zależności $\sigma - \varepsilon$ dotyczące drewna są takie same, jak w obliczeniach przekrojów nie wzmocnianych taśmami,
- zależność $\sigma - \varepsilon$ dotycząca taśm kompozytowych jest prostoliniowa,
- wykres odkształceń w przekrojach zginanych jest prostoliniowy.

Do przedstawienia modelu obliczeniowego wzmocnienia belki drewnianej wg prawa płaskich przekrojów posłużono się przykładem wzmocnienia jak na rys. 3.39.



Rys. 3.39. Przykład wzmocnienia belki drewnianej taśmą CFRP



Rys. 3.40. Wykresy dla zginanej belki drewnianej wzmocnionej taśmami CFRP: a) odkształceń, b) naprężeń

Założono wykres odkształceń jak na rys. 3.40 a), a schemat naprężeń pokazano na rys. 3.40 b).

Maksymalna wartość odkształceń w strefie ściskanej ε_c jest równa:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{0,mean}} = \frac{f_{m,d}}{E_{0,mean}} \quad (3.1)$$

gdzie: σ_c - maksymalne naprężenia ściskające w drewnie,
 $f_{m,d}$ - wytrzymałość obliczeniowa drewna na zginanie,
 $E_{0,mean}$ - moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien.

Odkształcenia w taśmie ε_f są równe maksymalnym odkształceniom w strefie rozciąganej ε_t i są proporcjonalne do zasięgu strefy ściskanej x - rys. 3.32 a). Zasięg strefy ściskanej x należy wyznaczyć z warunków równowagi sił w przekroju.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_t = \frac{h-x}{x} \cdot \varepsilon_c \quad (3.2)$$

Maksymalne naprężenia ściskające σ_c w belce wzmocnionej osiągają wartość $f_{m,d}$, a naprężenia rozciągające σ_t mają wartość:

$$\sigma_t = \varepsilon_t \cdot E_d \quad (3.3)$$

Siła rozciągająca w taśmie CFRP, F_f :

$$F_f = t_f \cdot b_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \quad (3.4)$$

gdzie: t_f - grubość taśmy CFRP,
 b_f - szerokość taśmy CFRP,
 ε_f - odkształcenia w taśmie CFRP,
 E_f - moduł sprężystości taśmy CFRP.

3.7.2. Model obliczeniowy według metody zastępczych charakterystyk przekroju

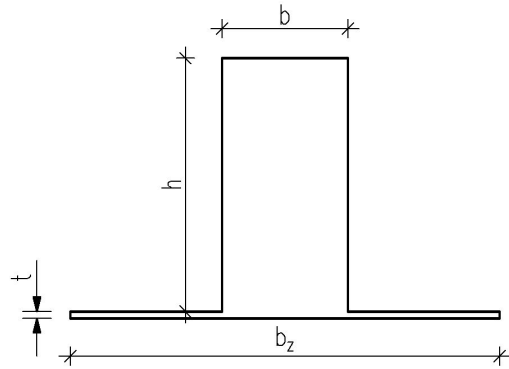
Założenia modelu obliczeniowego według metody zastępczych charakterystyk są następujące:

- taśma CFRP zastępowana jest w obliczeniach przekrojem drewna o charakterystykach jak pozostała część przekroju (poprzez zwiększenie wymiarów geometrycznych),
- wytrzymałość na ścinanie spoiny klejowej oraz osnowy taśmy CFRP jest znacznie większa od wytrzymałości na ścinanie drewna wzdłuż włókien, w związku z czym do obliczenia długości zakotwienia bierze się pod uwagę wytrzymałość drewna,
- zniszczenie może wystąpić w wyniku ścięcia w drewnie lub zniszczenia osnowy taśmy CFRP (zerwanie taśmy).

W modelu zastępczych charakterystyk przekroju wzmocnienie jest uwzględnione poprzez zwiększenie wymiarów geometrycznych przekroju poprzecznego belki drewnianej, tak jak to pokazano na rys. 3.41, a szerokość b_z wyznacza się wg wzoru:

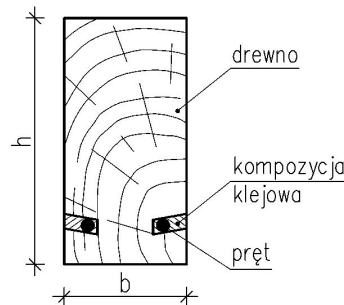
$$b_z = b_f \cdot \frac{E_f}{E_{0,mean}} \quad (3.5)$$

Następnie wyznacza się wskaźnik na zginanie dla „nowego” przekroju. Dalej postępuje się jak w klasycznych przypadkach obliczania nośności belki drewnianej.



Rys. 3.41. Zastępczy, ideowy przekrój poprzeczny belki drewnianej

Propozycję szacowania nośności belek drewnianych zbrojonych prętami (z zastosowaniem zastępczych charakterystyk przekroju) - opracowaną w [100], [101] - przedstawiono pracach [154], [160] oraz z pewnymi modyfikacjami w [112]. Metoda została opracowana dla prętów stalowych, jednak w [112] stwierdzono, że materiał wklejanego zbrojenia nie ma zasadniczego wpływu na sposób prowadzenia analiz statycznych. W celu uproszczenia analizy założono, że spoina klejowa i drewno mają zbliżone właściwości mechaniczne.



Rys. 3.42. Przekrój belki drewnianej wzmocnionej wklejonymi prętami

Sprowadzony do drewna moment bezwładności przekroju prostokątnego belki pojedynczo zbrojonej (rys. 3.42) określa się wg wzoru:

$$I_z = I_d \frac{1 + 4n\mu}{1 + n\mu} \quad (3.6)$$

gdzie: I_z - sprowadzony (zastępczy) moment bezwładności przekroju poprzecznego,
 I_d - moment bezwładności przekroju poprzecznego belki drewnianej,
 μ - procent zbrojenia,

$$n = \frac{E_s}{E_{0,mean}} \quad (3.7)$$

gdzie: E_s - moduł sprężystości podłużnej stali lub FRP,
 $E_{0,mean}$ - moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien,

Zastępczy wskaźnik wytrzymałości wynosi:

$$W_z = \frac{I_d(1 + 4n\mu)}{h_c(1 + n\mu)} \quad (3.8)$$

gdzie: h_c - odległość od głównej osi bezwładności do najbardziej oddalonego włókna ściskanego,

Naprężenia normalne w belce zginanej σ określa się wg wzoru (3.9), przy czym nie mogą one przekroczyć wartości dopuszczalnych, $f_{m,d}$.

$$\sigma = \frac{My}{I_{red}} \leq f_{m,d} \quad (3.9)$$

Naprężenia ścinające powinny spełniać warunek:

$$\tau = \frac{TS_z}{I_{red}b} \leq f_{v,d} \quad (3.10)$$

gdzie: $f_{m,d}$ - wytrzymałość obliczeniowa drewna na zginanie,
 $f_{v,d}$ - wytrzymałość obliczeniowa drewna na ścinanie wzdłuż włókien,
 y - odległość od głównej osi bezwładności do rozpatrywanego włókna
 T - maksymalna siła poprzeczna,
 S_z - sprowadzony (zastępczy) moment statyczny
 b - szerokość belki.

Sprowadzony moment statyczny we wzorze (3.10) określa się następująco:

$$S_z = \frac{bh^2}{8} (1 + n\mu) \quad (3.11)$$

gdzie: h - wysokość belki,

3.7.3. Model obliczeniowy według metody równości ugięć

Metoda ta wywodzi się z prób oszacowania ugięcia belek drewnianych wzmocnianych nakładkami ze stali, sklejki lub drewna litego wprowadzonymi po bokach, na całej wysokości przekroju.

Model obliczeniowy według metody równości ugięć zakłada, że:

- decydującym o nośności elementu jest stan graniczny użyteczności (ugięcie),
- element drewniany ugina się niezależnie oraz taśmy CFRP uginają się niezależnie, a ich ugięcia są równe.

Wychodząc z warunku ugięć belki drewnianej (swobodnie podpartej) i wklejonych taśm CFRP z nią współpracujących można zapisać:

$$\frac{5}{348} \frac{q_d \cdot l^4}{E_{0,mean} \cdot I_d} = \frac{5}{348} \frac{q_f \cdot l^4}{E_f \cdot I_f} \quad (3.12)$$

Zakładając, że belka obciążona jest obciążeniem równomiernie rozłożonym q , którego część q_d przenosi belka drewniana, a taśmy CFRP przenoszą q_f . Efekt wzmocnienia z określany jest jako stosunek:

$$z = \frac{q}{q_d} \quad (3.13)$$

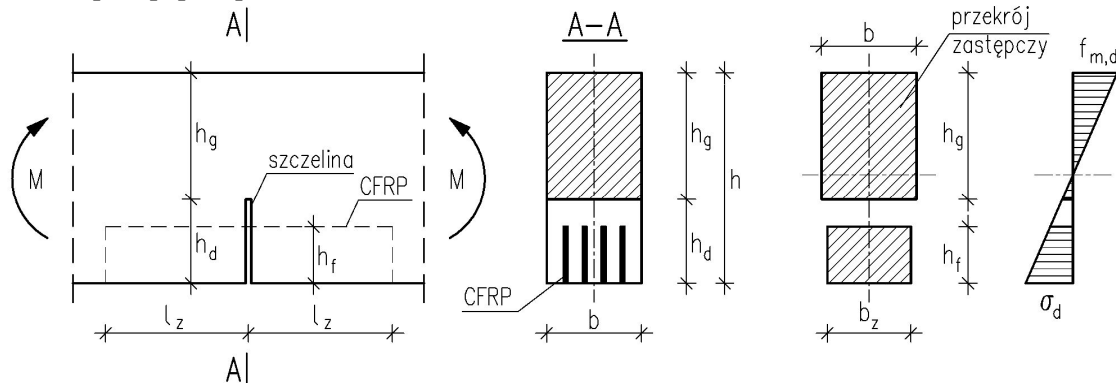
gdzie:

$$q = q_f + q_d \quad (3.14)$$

Pamiętać tu należy o tym, że moment bezwładności, zarówno taśmy CFRP jak i przekroju drewnianego, są wyznaczone względem osi obojętnej zginanego przekroju wzmocnionego. Stąd należy dokładnie wyznaczyć położenie osi obojętnej np.: stosując metodę zastępczych charakterystyk przekroju. W związku z tym, że metoda ta opiera się na stanie granicznym użyteczności, przy obliczaniu ugięć korzysta się tu z wartości charakterystycznych obciążeń.

3.7.4. Modele obliczeniowe odtworzenia strefy rozciąganej

Odtworzenie uszkodzonej strefy rozciąganej zaproponowane w [24], [144], [206], [208] przez P. Rappa i Z. Lisa dotyczy wklejenia taśm CFRP w układzie pionowym (rys. 3.43) i poziomym (rys. 3.44). Zaproponowane rozwiązanie jest kontynuacją analizy wzdłużnych połączeń drewnianych wzmocnionych blachami stalowymi [203], [205] lub prętami [204], [207].



Rys. 3.43. Model obliczeniowy belki z osłabioną strefą rozciąganą (taśmy wklejone pionowo), [144]

Oslabienie przekroju (destrukcja przekroju w postaci nieciągłości włókien) modelowano poprzecznym nacięciem od strony włókien rozciąganych na głębokość h_d . Odtworzenie nośności można uzyskać przez wzmocnienie osłabionej strefy rozciąganej za pomocą taśm CFRP, wklejonych w strefę rozciąganą belki. Celem badań było określenie liczby taśm i długości ich zakotwienia, l_z .

Założono, że wytrzymałość na ścinanie spoiny klejowej między taśmą węglową i drewnem jest większa niż wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie drewna wzdłuż włókien, $f_{v,d}$.

Przyjęto, że jedna taśma węglowa grubości t_f zastępuje przekrój drewna o szerokości b_1

$$b_1 = t_f \cdot n \quad (3.15)$$

gdzie:

$$n = \frac{E_f}{E_{0,mean}} \quad (3.16)$$

gdzie: E_f - moduł sprężystości taśmy CFRP,
 $E_{0,mean}$ - moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien.

Najkorzystniejszą liczbę m taśm węglowych przyjęto jako równą stosunkowi:

$$m = \frac{b}{t_f \cdot n} \quad (3.17)$$

gdzie: m - liczba całkowita zaokrąglona w górę

Oslabionemu przekrojowi belki wzmocnionej taśmami węglowymi odpowiada przekrój zastępczy szerokości w włóknach skrajnych strefy rozciąganej, (rys. 3.43):

$$b_z = m \cdot t_f \cdot n \quad (3.18)$$

Rozważając pracę belki w zakresie sprężystym, przez σ_t oznaczono naprężenie rozciągające w włóknach skrajnych przekroju zastępczego odpowiadające osiągnięciu w włóknach ściskanych naprężenia $f_{m,d}$ (wytrzymałość obliczeniowa drewna na zginanie) - rys. 3.43. Stąd:

$$\sigma_d = \frac{f_{m,d} W_g}{W_d} \quad (3.19)$$

gdzie: W_g - wskaźnik wytrzymałości górny przekroju zastępczego belki,
 W_d - wskaźnik wytrzymałości dolny przekroju zastępczego belki.

Przy założeniu, że średnie naprężenie styczne między spoiną klejową i drewnem nie przekracza wytrzymałości obliczeniowej drewna na ścinanie wzdłuż włókien $f_{v,d}$ warunek wytrzymałościowy ma postać:

$$\sigma_d b_z \leq 2 m f_{v,d} l_z \quad (3.20)$$

Uzyskana długość zakotwienia taśm węglowych l_z wynosi:

$$l_z \geq \frac{t_f W_g n f_{m,d}}{2 W_d f_{v,d}} \quad (3.21)$$

Największe naprężenie rozciągające σ_f w taśmach węglowych wyznaczono z warunku:

$$m t_f \sigma_f = \sigma_d b_z \quad (3.22)$$

stąd:

$$\sigma_f = \frac{W_g}{W_d} \cdot n \cdot f_{m,d} \quad (3.23)$$

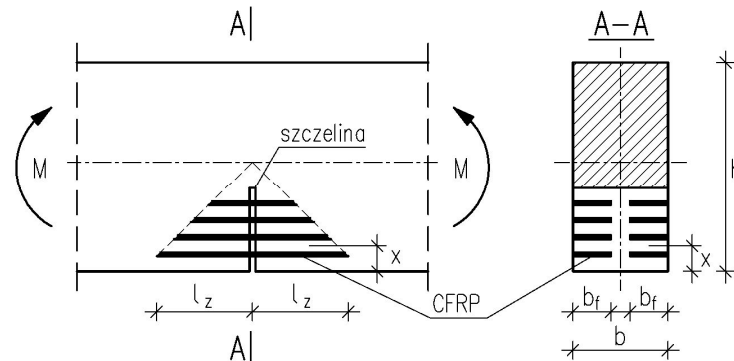
Gdy w przekroju wzmocnionym działa moment M_s , to:

$$\tau_k = \frac{M_s n t_f}{2 W_d l_z} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{gs} = \frac{M_s}{W_g} \quad (3.25)$$

gdzie: τ_k - największe, średnie naprężenie styczne w spoinie klejowej (włókna skrajne, rozciągane),
 σ_f - największe naprężenie rozciągające w taśmach,
 σ_{gs} - naprężenie w włóknach górnych belki.

Rapp i Lis przedstawili również rozwiązanie z taśmami wzmocniającymi CFRP wklejonymi w układzie poziomym, w strefie rozciąganej belki zginanej, równoległe do włókien. Istotą pomysłu jest rozproszony rozkład zbrojenia w całej strefie rozciąganej, w wyniku tego cała strefa rozciągana belki bierze udział w przenoszeniu naprężeń rozciągających przy zginaniu. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w całej strefie rozciąganej wpływa korzystnie na rozkład naprężeń, który staje się bardziej zbliżony do rozkładu naprężeń jak w litym przekroju zginanym, oraz powoduje zmniejszenie naprężeń rozciągających w skrajnych wkładkach zbrojenia w porównaniu z modelem pionowego ułożenia taśm.



Rys. 3.44. Model obliczeniowy belki z osłabioną strefą rozciąganą (taśmy wklejone poziomo), [208]

Celem analizy wytrzymałościowej było określenie liczby wkładek oraz długości zakotwienia l_z skrajnej wkładki zbrojenia, (rys. 3.44).

Z warunku zgodności odkształceń taśmy węglowej i drewna wynika, że dwie taśmy węglowe zastępują warstwę drewna grubości x równej:

$$x = \frac{2 t_f b_f n}{b} \quad (3.26)$$

gdzie: t_f - grubość taśmy CFRP,
 b_f - szerokość taśmy CFRP,
 b - szerokość belki.

Siła normalna F w dolnej warstwie zbrojenia nie powinna przekroczyć wytrzymałości na zginanie warstwy drewna o grubości x , zatem:

$$F = f_{m,d} \cdot b \cdot x = 2 \cdot t_f \cdot b_f \cdot f_{m,d} \cdot n \quad (3.27)$$

Naprężenie rozciągające obliczeniowe w dolnej warstwie zbrojenia jest równe:

$$\sigma_f = \frac{N}{2 \cdot t_f \cdot b_f} = f_{m,d} \cdot n \leq f_f \quad (3.28)$$

Długość zakotwienia dolnej warstwy zbrojenia wyznacza się z warunku:

$$F \leq 4 \cdot b_f \cdot l_z \cdot f_v \quad (3.29)$$

gdzie:

$$f_v = \min(f_{v,d}, f_{v,f}, f_{v,s}) \quad (3.30)$$

gdzie: $f_{v,s}$ - wytrzymałość obliczeniowa spoiny klejowej na ścinanie.

Długość zakotwienia dolnej warstwy zbrojenia otrzymuje się z warunku (3.27):

$$l_z \geq \frac{t_f \cdot f_{m,d} \cdot n}{2 \cdot f_v} \quad (3.31)$$

3.7.5. Model obliczeniowy wg norm amerykańskich

W normach amerykańskich [235] i [236] zostały przedstawione algorytmy do wyznaczania nośności i sztywności belek z drewna klejonego warstwowo (GLULAM) wzmocnionych, w strefie włókien rozciąganych lub w strefie włókien rozciąganych i ściskanych, już na etapie produkcji, taśmami kompozytowymi. Norma przewiduje do stosowania kompozyty zbrojone włóknami: szklano-aramidowymi, aramidowymi i węglowo-aramidowymi.

Za minimalny procent zbrojenia przyjmuje się 0,25%, natomiast maksymalny nie powinien przekraczać 2% w przypadku pojedynczego zbrojenia oraz 4% w przypadku zbrojenia strefy ściskanej i rozciąganej. Taśmy FRP mogą być doklejane do dolnej i górnej powierzchni bądź wklejane wewnątrz przekroju belki, pod ostatnią warstwę.

Dla wyznaczenia położenia osi bezwładności przekroju przy zginaniu poczyniono założenia:

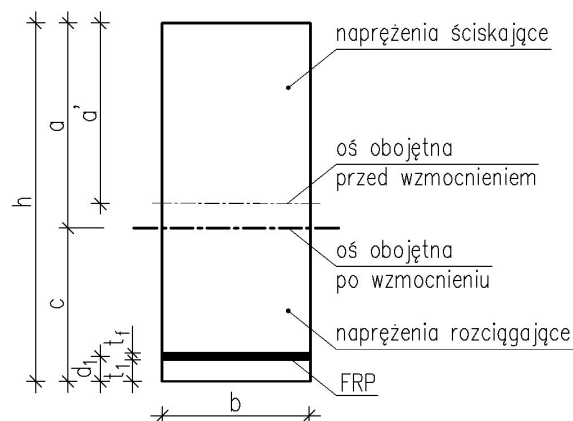
- rozróżniono moduły sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu i przy rozciąganiu,
- moduł sprężystości drewna przy rozciąganiu sprowadzono do modułu sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu za pomocą współczynnika n' :

$$n' = \frac{E_{t,0,mean}}{E_{c,0,mean}} \quad (3.32)$$

- moduł sprężystości taśmy FRP przy rozciąganiu sprowadzono do modułu sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu za pomocą współczynnika n :

$$n = \frac{E_f}{E_{c,0,mean}} \quad (3.33)$$

gdzie: E_f - moduł sprężystości taśmy FRP przy rozciąganiu,
 $E_{t,0,mean}$ - średni moduł sprężystości drewna przy rozciąganiu wzdłuż włókien,
 $E_{c,0,mean}$ - średni moduł sprężystości drewna przy ściskaniu wzdłuż włókien.



Rys. 3.45. Przekrój belki wzmocnionej w strefie rozciąganej taśmą FRP, [235]

Wysokość strefy ściskanej a (rys. 3.45) dla belki zbrojonej tylko w strefie rozciąganej, uwzględniając poczynione wyżej założenia, wyznaczono wg wzoru:

$$a = a' + M_t - N_t \quad (3.34)$$

gdzie:

$$a' = h \frac{\sqrt{n'}}{1 + \sqrt{n'}} \quad (3.35)$$

$$N_t = n' d_1 (n - 1)^{0,63} \frac{t_f}{a'} \quad (3.36)$$

$$M_t = n' (n - 1)^{0,63} t_f \quad (3.37)$$

gdzie: h - wysokość belki,
 t_f - grubość taśmy FRP,
 t_l - grubość „otuliny” taśmy,
 d_1 - środek ciężkości zbrojenia.

Moment bezwładności sprowadzonego przekroju I_z , po wyznaczeniu położenia osi obojętnej wzmocnionego elementu, oblicza się wykorzystując twierdzenie *Steinera*:

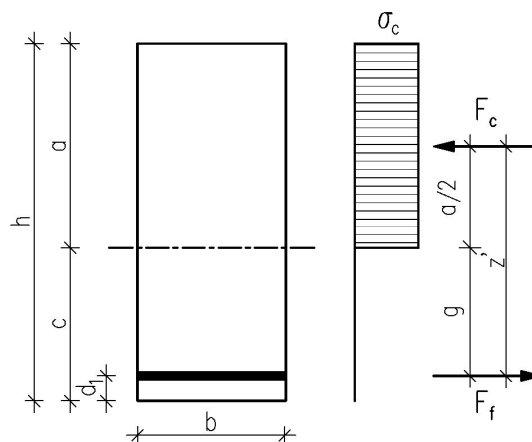
$$I_z = \frac{b a^3}{3} + \frac{b n' h_t^3}{3} + b n t_l \left[\frac{t_l^2}{12} + (c - d_1)^2 \right] + b n' t_l \left[\frac{t_l^2}{12} + \left(c - \frac{t_l}{2} \right)^2 \right] \quad (3.38)$$

gdzie:

$$h_t = h - a - t_l - t_f \quad (3.39)$$

$$c = h - a \quad (3.40)$$

Dla wyznaczonego w ten sposób sprowadzonego momentu bezwładności ugięcie obliczane jest ze znanych wzorów z teorii sprężystości, w zależności od schematu obciążenia, z uwzględnieniem sprowadzonego momentu bezwładności oraz średniego modułu sprężystości przy zginaniu $E_{0, mean}$.



Rys. 3.46. Schemat obliczeniowy belki wzmocnionej FRP w strefie rozciąganej, [235], [236]

Nośność przekroju wzmocnionego wyznaczana jest przy założeniu pełnego uplastycznienia strefy ściskanej. O nośności decyduje wyczerpanie nośności strefy ściskanej drewna. W wyznaczeniu nośności pominięto udział drewna w strefie włókien rozciąganych. Zakłada się, że naprężenia rozciągane przenosi taśma FRP. Na rys. 3.46 przedstawiono schemat obliczeniowy belki zbrojonej w strefie włókien rozciąganych.

Dla wyżej wymienionych założeń, dopuszczalny moment zginający przenoszony przez przekrój wynosi:

$$M_y = F_c \cdot z' \quad (3.41)$$

gdzie:

$$F_c = \sigma_c \cdot a \cdot b \quad (3.42)$$

$$z' = \frac{a}{2} + g = \frac{a}{2} + (c - d_1) = h - \frac{a}{2} - d_1 \quad (3.43)$$

Naprężenia rozciągające w taśmie FRP wyznacza się wg wzoru:

$$\sigma_f = \frac{M_y \cdot (g + \frac{t_f}{2}) \cdot n}{I_z} \quad (3.44)$$

Dopuszczalne naprężenia ścinające dla belek zbrojonych:

$$\tau_f = \frac{2}{3} \cdot f_v' \cdot b \cdot h \quad (3.45)$$

gdzie:

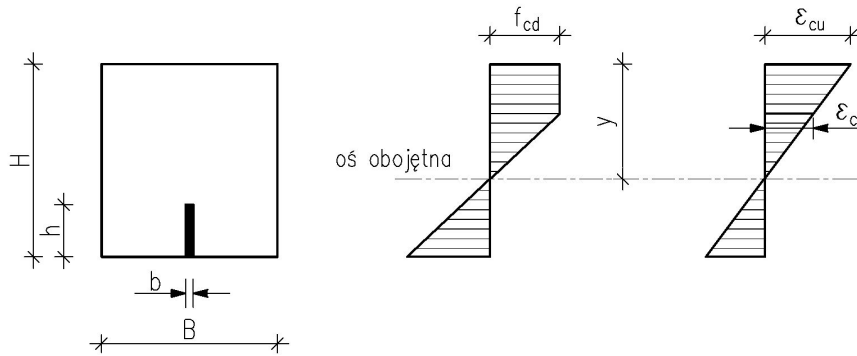
$$f_v' = f_v + 20 \ln(x) \quad (3.46)$$

3.7.6. Model obliczeniowy wzmocnienia wg. włoskiej instrukcji CNR

W przypadku wzmocniania materiałami FRP ugiętych już elementów zginanych, biorąc pod uwagę ich ograniczony wkład w zwiększenie sztywności, wzmocnienie spełnia swoje zadanie szczególnie w warunkach granicznych, podczas gdy w warunkach pracy jego skuteczność można określić jako mało znaczącą. W warunkach pracy, w przypadku wzmocnienia FRP, przewidziane jest jedynie sprawdzenie naprężeń zgodnie z [45]. W przypadku przekroczenia stanów granicznych proces weryfikacji opiera się na następujących założeniach, [46]:

- zachowanie prawa płaskich przekrojów,
- idealne połączenie drewna i FRP,
- model pracy przekroju jest liniowo-sprężysty aż do momentu pęknięcia,
- model pracy przekroju jest sprężysto-plastyczny w strefie ściskanej,
- wkładka FRP pracuje w obszarze liniowo-sprężystym aż do pęknięcia przekroju drewnianego,
- zniszczenie elementu zginanego następuje na skutek osiągnięcia granicznych odkształceń w strefie ściskanej bądź rozciąganej.

Na rys. 3.47 przedstawiono przykładowe wykresy naprężeń normalnych i odkształceń w przekroju prostokątnym wzmocnionym pojedynczą warstwą FRP.



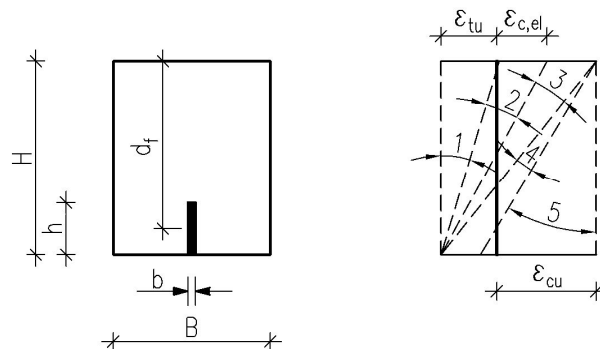
Rys. 3.47. Wykresy naprężeń i odkształceń prostokątnego przekroju drewnianego wzmocnionego pojedynczą warstwą FRP, [46]

Weryfikacja dotyczy przekroju drewnianego o powierzchni A , wzmocnionego materiałem FRP o powierzchni A_f , umieszczonym w odległości d_f od górnej krawędzi ściskanej ($d_f = H - h/2$).

Spodziewana postać zniszczenia może obejmować następujące przypadki:

- 1 - odkształcenie graniczne drewna - cały przekrój sprężony (rozciągany),
- 2 - odkształcenie sprężyste drewna w strefie ściskanej,
- 3 - odkształcenie plastyczne drewna w strefie ściskanej,
- 4 - odkształcenie graniczne drewna w strefie ściskanej przy wyteżeniu zbrojenia,
- 5 - odkształcenie graniczne drewna w strefie ściskanej przy wystąpieniu naprężeń ściskających na górnej krawędzi wzmocnienia.

Obszary graniczne wyszczególnione na wykresach odkształceń, odpowiadających opisanym wyżej sytuacjom, pokazane zostały na rys. 3.48.



Rys. 3.48. Wykresy odkształceń - obszary graniczne, [46]

Każdemu z wykresów granicznych odkształceń, które są przypisane jednemu z wyżej opisanych obszarów, odpowiada jeden punkt (N, M) granicy wytrzymałości wzmocnionego przekroju.

Równania rozwiązujące problem, to równania równowagi przy przesuwaniu w kierunku osi elementu i równowagi przy obrocie wokół osi przechodzącej przez środek ciężkości warstwy FRP i równoległe do osi neutralnej.

Weryfikacja ma na celu wyjaśnienie następującej nierówności zawierającej niewiadomą:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}(N_{Sd}) \quad (3.47)$$

gdzie M_{Sd} to moment obliczeniowy przekroju zespolonego, a M_{Rd} to moment graniczny, który jest funkcją siły sprężającej przekroju zespolonego, N_{Sd} .

Należy odwołać się do następujących wartości bezwymiarowych:

- N_1 , równy stosunkowi normalnego naprężenia N_{Sd} i wartości $B \cdot H \cdot f_{cu}$,

- M_1 , równy stosunkowi momentu N_{Rd} i wartości $B \cdot H^2 \cdot f_{cu}$,
- ξ , równy stosunkowi odległości osi obojętnej od górnych włókien do wysokości przekroju poprzecznego belki (równy stosunkowi odległości y osi obojętnej od ściskanej krawędzi przekroju do wysokości przekroju H - rys. 3.48).

Jak wyraźnie widać, pozycja osi obojętnej ξ , może zostać określona poprzez równanie równowagi przesunięcia w kierunku osi elementu. Następnie, moment graniczny może zostać obliczony poprzez równanie równowagi obrotu wokół osi przechodzącej przez środek ciężkości warstwy FRP i równoległej do osi obojętnej.

Strefa 1

Osiągnięcie granicznego odkształcenia drewna z całkowicie sprężonym przekrojem (rozciąganie z małym mimośrodem).

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{tu} \quad (3.48)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (3.49)$$

$$-\infty \leq \xi \leq 0 \quad (3.50)$$

$$N_1(\xi) = \frac{\eta}{2} \left(2 \cdot \xi - 1 + \frac{2 \cdot \rho_f}{1 - \xi} \cdot n \cdot (\xi - p_f) \right) \quad (3.51)$$

$$M_1(\xi) = \frac{\eta}{2 \cdot (1 - \xi)} \cdot \xi^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cdot \xi \right) + \eta \cdot \frac{1 - \xi}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1 - \xi}{3} \right) + \eta \cdot \frac{n}{1 - \xi} \cdot (p_f - \xi) \cdot \rho_f \cdot \left(p_f - \frac{1}{2} \right) \quad (3.52)$$

gdzie:

- ε_s - odkształcenie włókien górnej krawędzi,
- ε_{tu} - graniczne odkształcenie drewna w strefie rozciąganej,
- ε_i - odkształcenie włókien dolnej krawędzi,
- ξ - stosunek odległości osi obojętnej od górnych włókien do wysokości przekroju poprzecznego belki,
- η - stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna,
- n - stosunek modułu sprężystości wzmocnienia FRP przy rozciąganiu wzdłuż włókien do modułu sprężystości drewna przy rozciąganiu wzdłuż włókien,
- ρ_f - stosunek przekroju poprzecznego drewna do przekroju wzmocnienia,
- p_f - stosunek odległości wzmocnienia FRP do górnych włókien do wysokości przekroju poprzecznego belki.

Strefa 2

Osiągnięcie granicznego odkształcenia sprężystego drewna (rozciąganie z dużym mimośrodem).

$$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{c,el} \quad (3.53)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (3.54)$$

$$-\infty \leq \xi \leq \frac{1}{1+\eta} \quad (3.55)$$

$$N_2(\xi) = \frac{\eta}{2} \left(2 \cdot \xi - 1 + \frac{2 \cdot \rho_f}{1-\xi} \cdot n \cdot (\xi - p_f) \right) \quad (3.56)$$

$$M_2(\xi) = \frac{\eta}{2 \cdot (1-\xi)} \cdot \xi^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \cdot \xi \right) + \eta \cdot \frac{1-\xi}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1-\xi}{3} \right) + \eta \cdot \frac{n}{1-\xi} \cdot (p_f - \xi) \cdot \rho_f \cdot \left(p_f - \frac{1}{2} \right) \quad (3.57)$$

gdzie: $\varepsilon_{c,el}$ - graniczne sprężyste odkształcenie drewna w strefie ściskanej.

Strefa 3

Osiągnięcie granicznego odkształcenia plastycznego drewna w strefie ściskanej

$$\varepsilon_{c,el} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{c,u} \quad (3.58)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \quad (3.59)$$

$$\frac{1}{1+\eta} \leq \xi \leq \frac{k}{k+\eta} \quad (3.60)$$

$$N_3(\xi) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{\eta^2} \cdot (\xi - 1) + \xi \cdot \left(\frac{2}{\eta} + 1 \right) - 1 + \frac{2 \cdot \rho_f}{1-\xi} \cdot n \cdot (\xi - p_f) \right) \quad (3.61)$$

$$M_3(\xi) = \frac{1-\xi}{2 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2 \cdot (1-\xi)}{3 \cdot \eta} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(\xi - \frac{1-\xi}{\eta} \right) \cdot \left(1 - \xi + \frac{1-\xi}{\eta} \right) + \eta \cdot \frac{1-\xi}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1-\xi}{3} \right) + n \cdot \eta \cdot \left(\frac{p_f - \xi}{1-\xi} \right) \cdot \rho_f \cdot \left(p_f - \frac{1}{2} \right) \quad (3.62)$$

gdzie: ε_{cu} - graniczne plastyczne odkształcenie drewna w strefie ściskanej,
 k - stosunek granicznego odkształcenia plastycznego do granicznego odkształcenia sprężystego w strefie ściskanej drewna.

Strefa 4

Osiągnięcie granicznego odkształcenia drewna w strefie ściskanej z wyteżonym zbrojeniem.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{c,u} \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_{cu} \cdot \frac{1-p_f}{p_f} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{tu} \quad (3.64)$$

$$\frac{k}{k+\eta} \leq \xi \leq p_f \quad (3.65)$$

$$N_4(\xi) = \xi \cdot k \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} - \frac{1}{2 \cdot \xi^2} + \frac{1}{\xi} - \frac{1}{2} \right) + \rho_f \cdot k \cdot n \cdot \left(1 - \frac{\rho_f}{\xi} \right) \quad (3.66)$$

$$M_4(\xi) = \frac{\xi}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2 \cdot \xi}{3 \cdot k} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{k} \right) \cdot \left(1 - \xi + \frac{\xi}{k} \right) \cdot \xi + \\ + \frac{k}{6 \cdot \xi} \cdot (1 - \xi)^2 \left(\frac{1}{2} + \xi \right) + n \cdot \frac{\rho_f \cdot k}{\xi} \cdot (p_f - \xi) \cdot \left(p_f - \frac{1}{2} \right) \quad (3.67)$$

Strefa 5

Osiągnięcie granicznego odkształcenia drewna w strefie ściskanej przy wystąpieniu naprężeń ściskających górnej krawędzi wzmocnienia.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{c,u} \quad (3.68)$$

$$0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{cu} \cdot \frac{1 - p_f}{p_f} \quad (\text{włókna dolne sprężone}) \quad (3.69)$$

$$0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{cu} \quad (\text{włókna dolne ściskane}) \quad (3.70)$$

$$p_f \leq \xi \leq \frac{k}{k-1} \quad (3.71)$$

$$N_5(\xi) = \xi \cdot k \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2 \cdot k^2} - \frac{1}{2 \cdot \xi^2} + \frac{1}{\xi} - \frac{1}{2} \right) \quad (3.72)$$

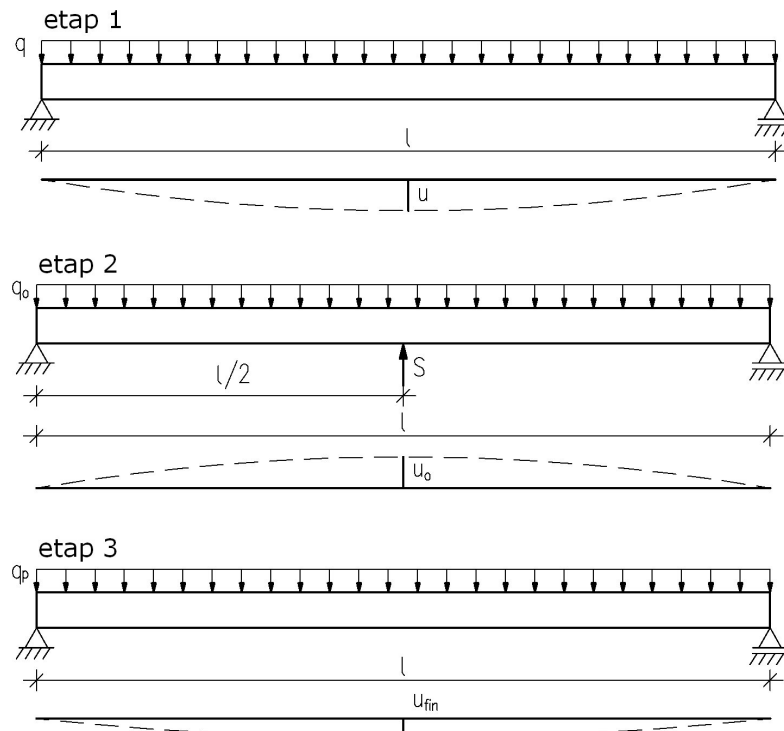
$$M_5(\xi) = \frac{\xi}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2 \cdot \xi}{3 \cdot k} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{k} \right) \cdot \left(1 - \xi + \frac{\xi}{k} \right) \cdot \xi + \frac{k}{6 \cdot \xi} \cdot (1 - \xi)^2 \left(\frac{1}{2} + \xi \right) \quad (3.73)$$

3.7.7. Model obliczeniowy wzmocnienia według C. Malinowskiego.

Jednym ze stosowanych sposobów wzmocniania nadmiernie zniszczonych lub odkształconych belek drewnianych jest wykonanie nakładek bocznych nie dochodzących do podpór [120]. Sposób ten stosuje się także w przypadku modernizacji obiektów w odniesieniu do elementów, które poddane zostaną działaniu zwiększonych obciążeń eksploatacyjnych.

Tradycyjnie połączenia nakładek z belką wykonuje się za pomocą łączników mechanicznych. W przypadku nakładek z taśm CFRP konieczne jest użycie kleju (kompozycji epoksydowej), charakteryzującego się pewną podatnością. Z praktyki wiadomo, że dotychczas stosowane zasady wymiarowania wzmocnień z użyciem łączników mechanicznych zazwyczaj nie uwzględniają wpływu podatności i przyjmują założenie sztywnych połączeń nakładek z belką, [120].

Weryfikację tej metody przeprowadzono w pracy [150]. Stwierdzono, że jest ona zbyt skomplikowana do zastosowań inżynierskich. Ponadto nie jest tu jednoznaczne w jakim stopniu i do jakiego momentu taśma współpracuje z drewnem, natomiast potrzebna długość zakotwienia jest jedynie oszacowana w przybliżeniu i przy uwzględnieniu zaleceń opartych na doświadczeniach.



Rys. 3.49. Etapy podczas wzmocniania belek nakładkami wg koncepcji C. Malinowskiego, [114]

Oś belki pierwotnej, poddanej przed wzmocnieniem działaniu obciążenia zewnętrznego, doznaje ugięcia wg krzywej:

$$y_{1b} = f_1(x) \tag{3.74}$$

Przed przystąpieniem do wzmocnienia belkę obciąża się wymuszając strzałkę odwrotną o wartości u_o . Bezpośrednio przed wzmocnieniem ugięcie osi belek opisuje zatem funkcja:

$$y_{2b} = f_2(x) \tag{3.75}$$

przy czym:

$$u_o = f_1\left(x = \frac{l}{2}\right) - f_2\left(x = \frac{l}{2}\right) \tag{3.76}$$

Do tak ukształtowanej belki mocuje się nakładki wzmocniające (rys. 3.49), których odkształcenie początkowe jest równe 0 zaś położenie osi obojętnej, w przyjętym układzie współrzędnych, opisuje funkcja:

$$y_{1n} = f_3(x) \tag{3.77}$$

dla x ograniczonego końcami nakładek.

Z chwilą zakończenia montażu nakładek, demontażu stemplowania i podjęcia ponownego użytkowania konstrukcji oś wzmocnionej belki doznaje odkształcenia dającego się opisać krzywą:

$$y_{3b} = f_4(x) \tag{3.78}$$

Na kształt linii ugięcia mają wpływ oddziaływania między belką a nakładkami przekazywane przez warstwę kompozycji klejowej. Przemieszczenia osi samych nakładek pod wpływem oddziaływań od warstwy klejowej, można opisać funkcją:

$$y_{2n} = f_5(x) \quad (3.79)$$

Przyrost przemieszczenia między fazą montażu a fazą eksploatacji wynosi:
dla belki:

$$\Delta y_b = y_{3b} - y_{2b} = f_4(x) - f_2(x) \quad (3.80)$$

dla nakładek:

$$\Delta y_w = y_{2w} - y_{1w} = f_5(x) - f_3(x) \quad (3.81)$$

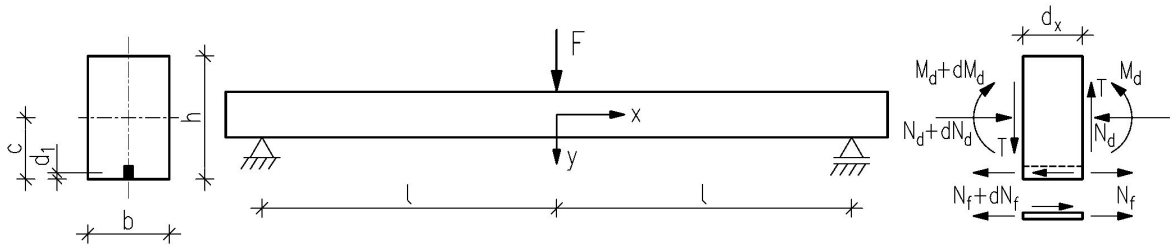
Na skutek podatności połączenia przyrosty przemieszczeń belki są większe od przyrostów przemieszczeń nakładek. Różnica ta równa jest przemieszczeniu wzajemnie połączonych elementów (Δ_p) odpowiadającemu sile przenoszonej przez spoinę.

$$\Delta y_b - \Delta y_w = \Delta_p \quad (3.82)$$

3.7.8. Model obliczeniowy belek zbrojonych kompozytem wg J. Niczyjego.

W [170] przedstawiona została metoda szacowania nośności belek zbrojonych kompozytem szklano-epoksydowym - rys 3.50. Model analityczny pracy belki po wzmocnieniu opracowano przyjmując następujące założenia:

- elementy zbrojenia i belka pracują w zakresie odkształceń sprężystych,
- drewno charakteryzuje się stałym modułem sprężystości wzdłuż włókien,
- sztywność pręta zbrojeniowego pomija się ze względu na jego wymiary.



Rys. 3.50. Schemat statyczny belki z układem sił przyjętym w [170]

Dla tak przyjętego układu, zbudowano wyrażenie opisujące naprężenia ścinające w belce, na długości połączenia klejowego zbrojenia, w przedziale ($-l \leq x \leq 0$):

$$\tau_k = \frac{T}{(c - d_1) \psi s} (1 - e^{a'x}) \quad (3.83)$$

gdzie:

$$a'^2 = \frac{K s (c - d_1)^2 \psi}{EI} \quad (3.84)$$

$$\psi = 1 + \frac{I_d}{n (c - d_1)^2 A_f} + \frac{I_d}{(c - d_1)^2 A_d} \quad (3.85)$$

gdzie:

$$n = \frac{E_f}{E_{0,mean}} \quad (3.86)$$

- T - siła tnąca w rozpatrywanym przekroju,
 $(c-d_1)$ - położenie (rozstaw) środków ciężkości przekroju zbrojenia i przekroju drewna,
 s - obwód przekroju zbrojenia,
 x - odległość rozpatrywanego przekroju od początku układu współrzędnych.
 K - współczynnik proporcjonalności określany eksperymentalnie; jest on miarą oporu, jaki wykazuje połączenie klejowe w stosunku do wzajemnego przemieszczenia między zbrojeniem a drewnem,
 E_f - moduł sprężystości zbrojenia FRP,
 $E_{0,mean}$ - moduł sprężystości drewna,
 A_f - pole przekroju zbrojenia FRP
 A_d - pole przekroju drewna
 I_d - główny, centralny moment bezwładności drewnianej części przekroju.

Znając rozkład naprężeń ścinających w połączeniu klejowym wyznaczono naprężenia w rozciągającym zbrojeniu dla przedziału $(-l \leq x \leq 0)$:

$$\sigma_f = \frac{T}{c \psi A_f} \left[x + l + \frac{1}{a'} (e^{-a'l} - e^{a'x}) \right] \quad (3.87)$$

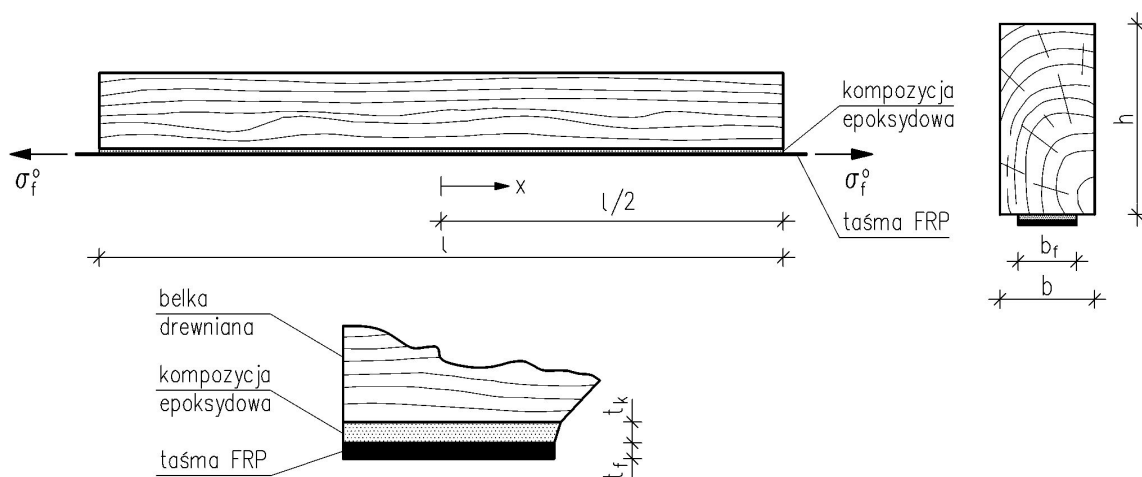
gdzie: l - połowa rozpiętości belki.

Naprężenia w drewnie równe są sumie naprężeń od momentu zginającego M i siły ściskającej N_d , gdzie:

$$N_d = -\sigma_f A_f \quad (3.88)$$

3.8. MODELE ZAKOTWIENIA KLEJOWEGO WKŁADEK WZMACNIAJĄCYCH

3.8.1. Model zaproponowany przez T.C. Triantofillou



Rys. 3.51. Schemat wzmocnienia belek drewnianych przy użyciu wstępnie naprężonych taśm FRP, [233]

W pracy [233] zaproponowano wyrażenie przydatne do szacowania naprężeń stycznych na długości połączenia klejowego sprężonej taśmy CFRP i drewna (rys. 3.51). Opierając się na przemieszczeniach układu „drewno-klej-taśma sprężająca” w kierunku x

(począwszy od środka rozpiętości belki) przed - i po sprężeniu, korzystając z równań równowagi, przy założeniu ważności prawa Hooke'a, otrzymano równanie ogólne określające rozkład naprężeń ścinających w połączeniu klejowym „spoina-drewno”.

$$\tau = A e^{\omega x} + B e^{-\omega x} \quad (3.89)$$

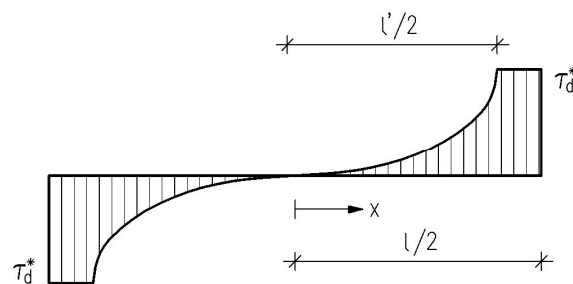
gdzie:

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{t_k t'} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{\alpha}{E_{0,mean}} \right)} \quad (3.90)$$

$$t' = t_f \cdot \frac{b_f}{b} \quad (3.91)$$

gdzie: A, B - stałe,
 $E_{0,mean}$ - moduł sprężystości podłużnej drewna (E_d),
 E_f - moduł sprężystości podłużnej taśmy kompozytowej,
 G - moduł sprężystości poprzecznej drewna,
 G_k - moduł sprężystości poprzecznej kleju
 α - parametr relacji sprężenia dolnych włókien belki σ_p do naprężeń w taśmie kompozytowej σ_f ($\sigma_p = \alpha \sigma_f$). Parametr α zależy od kształtu przekroju poprzecznego belki i wg [233] jest równy $4t'/h$ dla przekroju prostokątnego,
 b_f - szerokość taśmy sprężającej,
 b - szerokość przekroju poprzecznego belki drewnianej,
 t_k - grubość warstwy kleju,
 t_f - grubość taśmy sprężającej,
 h - wysokość przekroju poprzecznego belki drewnianej.

Typowy rozkład naprężeń ścinających na długości połączenia klejowego „drewno-taśma sprężająca” przedstawiono na rys. 3.52.



Rys. 3.52. Rozkład naprężeń ścinających na długości połączenia klejowego, [233]

Założono, że zniszczenie połączenia klejowego jest poprzedzone uplastycznieniem spoiny po osiągnięciu granicznej wartości naprężeń ścinających równej τ_d^* . Z warunków brzegowych otrzymano wzór na długość strefy sprężystej:

$$l' = \frac{2 \ln \left(\frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + 4}}{2} \right)}{\omega} \quad (3.92)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{2\gamma_d^{el}}{\gamma_d^*} \cdot \sinh \frac{\omega \cdot l}{2} \quad (3.93)$$

gdzie: γ_d^{el} - maksymalny sprężysty kąt odkształcenia postaciowego drewna,
 γ_d^* - graniczny kąt odkształcenia postaciowego drewna.

Ostatecznie, z równości naprężeń oraz ciągłości krzywej naprężeń normalnych w taśmie sprężającej w punkcie $x = l'/2$ otrzymano wartość wstępnego naprężenia σ_f^o , powodującego zniszczenie elementu zespolonego poprzez ścięcie drewna, równą:

$$\sigma_f^o = E_f \cdot t_k \cdot \gamma_d^{el} \cdot \omega \cdot \left[ctg h \frac{\omega l'}{2} + \frac{\omega(l-l')}{2} \right] \quad (3.94)$$

Pełne wykorzystanie wzmocnienia belki jest tu możliwe jedynie przy założeniu pracy przekroju drewnianego w strefie plastycznej. Utrudnia to znacznie i rozbudowuje proces obliczeniowy, w związku z tym zamieszczono tu jedynie ostateczne wyrażenia, według których wyznacza się niszczący moment zginający:

$$\frac{M_u}{bh^2 E_{0,mean}} = \max \left(C_2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} + 1 \right) c \right] \frac{\frac{3+m}{2} \frac{c}{m} \frac{\varepsilon_c}{c-1} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} + 1}{\frac{2+m}{m} \frac{c}{c-1} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} + 1} \right\} + C_1 c \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right) - \frac{Tc}{3} \right) \quad (3.95)$$

gdzie:

$$T = \frac{c}{2} \cdot \varepsilon_t \quad (3.96)$$

$$C_1 = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_t} \quad (3.97)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left[1 - c \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} + 1 \right) \right] \left[(2+m)\varepsilon_c + m \left(1 - \frac{1}{c} \right) \varepsilon_t \right] \quad (3.98)$$

natomiast c (stosunek wysokości strefy rozciąganej do całkowitej wysokości przekroju) wyznacza się z równania:

$$(1+m) \left(1 + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right)^2 c^2 + \left[2\rho_f \frac{E_f}{E_{0,mean}} \frac{(\varepsilon_f^i + \varepsilon_t)}{\varepsilon_t} - 2(1+m) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} - 2m \right] c + m = 0 \quad (3.99)$$

przy założonych warunkach:

- uplastycznienia przekroju drewna:

$$\varepsilon_c \leq (1-c) \frac{\varepsilon_t}{c} \quad (3.100)$$

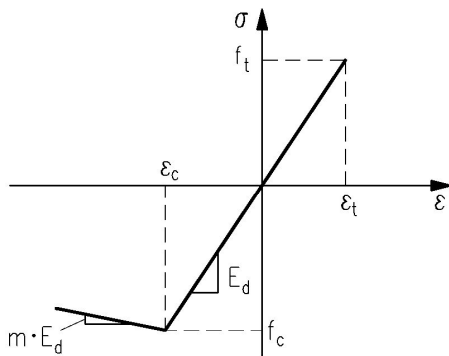
- zerwania taśmy sprężającej:

$$\varepsilon_f^* \geq \varepsilon_t + \varepsilon_f^i \quad (3.111)$$

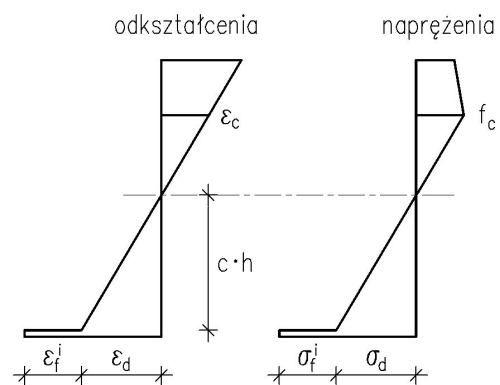
- zniszczenia przekroju drewna:

$$\varepsilon_t \leq \frac{f_m}{E_{0,mean}} \tag{3.112}$$

- gdzie:
- ε_t - odkształcenie skrajnych, dolnych włókien drewna,
 - ε_c - odkształcenie drewna odpowiadające jego wytrzymałości na ściskanie,
 - ε_f^* - odkształcenie taśmy kompozytowej przy zniszczeniu,
 - ε_f^i - wstępne odkształcenie taśmy kompozytowej,
 - ρ_f - stopień zbrojenia przekroju, $\rho_f = b_f t_f / bh$,
 - f_c - wytrzymałość na ściskanie drewna,
 - f_m - wytrzymałość na zginanie drewna,
 - f_t - wytrzymałość na rozciąganie drewna,
 - m - współczynnik nachylenia prostej, zależności „odkształcenie - naprężenie” dla drewna - rys. 3.53.



Rys. 3.53. Wykres „odkształcenie - naprężenie” dla drewna (model Bazana), [233]

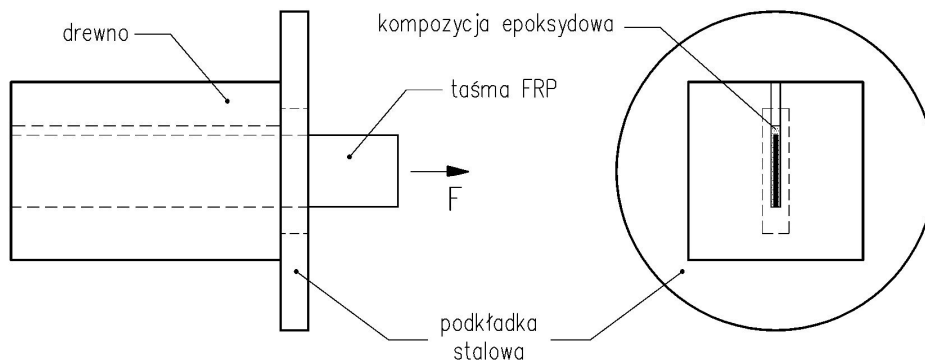


Rys. 3.54. Rozkład odkształceń i naprężeń normalnych w przekroju belki sprężonej, [233]

Rozkłady odkształceń i naprężeń normalnych analizowanej belki sprężonej przedstawiono na rys. 3.54.

Istotnym problemem, związanym ze sprężaniem elementów drewnianych przy użyciu CFRP, jest pełzanie i relaksacja naprężeń w elementach wzmocnionych. Jest to szczególnie istotne dla pracy belek pod obciążeniem długotrwałym.

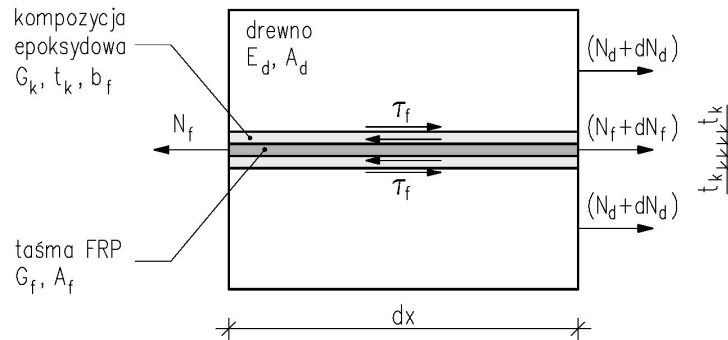
3.8.2. Model zaproponowany przez K. Bergmeistera i W. Luggina



Rys.3.55. Model badawczy, [145]

Na podstawie badań połączenia „taśma CFRP - drewno” zaproponowano model matematyczny. Model przyjęty w badaniach przedstawiono na rys. 3.55. Badano wytrzymałość na ścinanie połączenia w zależności od wymiarów geometrycznych otworu w drewnie oraz długości i szerokości taśmy CFRP.

Przeprowadzona analizę matematyczną oparto na założeniu liniowo-sprężystych charakterystyk materiałowych oraz, że forma deformacja w warstwie kleju jest wywołana ścinaniem - rys. 3.56, [145].



Rys. 3.56. Wyodrębniony, różniczkowo mały element przyjęty w analizie, [145]

$$\varepsilon_d = \frac{d u_d}{d x} = u_d' \tag{3.113}$$

$$\varepsilon_f = \frac{d u_f}{d x} = u_f' \tag{3.114}$$

gdzie: ε_d - odkształcenie drewna,
 ε_f - odkształcenie taśmy kompozytowej,

Dla naprężeń (σ) i sił (N) panujących w przekroju można napisać wyrażenia:

$$\sigma_d = E_d \cdot \varepsilon_d \tag{3.115}$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \tag{3.116}$$

gdzie: E_d - moduł sprężystości podłużnej drewna,
 E_f - moduł sprężystości podłużnej taśmy kompozytowej,

$$N_d = \int_{(A)} \sigma_d d A_d = E_d \cdot \varepsilon_d \cdot A_d \tag{3.117}$$

$$N_f = \int_{(A)} \sigma_f d A_f = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f \tag{3.118}$$

gdzie: A_d - pole przekroju poprzecznego drewna,
 A_f - pole przekroju poprzecznego taśmy kompozytowej,

Ponadto:

$$d N_d + d N_f = 0 \tag{3.119}$$

$$2\tau_f \cdot b_f \cdot dx + dN_d = 0 \quad (3.120)$$

gdzie: τ_f - naprężenia ścinające w spoinie,
 b_f - szerokość taśmy kompozytowej,
 A_d - pole przekroju poprzecznego drewna,
 A_f - pole przekroju poprzecznego taśmy kompozytowej,

Poślizg s jest równy:

$$s = u_f - u_d \quad (3.121)$$

po przekształceniu otrzymano:

$$s'' = \frac{2\tau_f \cdot b_f}{E_f \cdot A_f} - \frac{2\tau_f \cdot b_f}{E_d \cdot A_d} \quad (3.122)$$

podstawiając:

$$\tau_f = f(s) \quad (3.123)$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_d} \quad (3.124)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{A_d} \quad (3.125)$$

otrzymano:

$$s'' - \frac{(1 + \alpha_f \cdot \rho_f) \cdot 2 \cdot f(s)}{E_f \cdot t_f} = 0 \quad (3.126)$$

gdzie: t_f - grubość taśmy kompozytowej,

Inne badania na ścinanie połączenia drewna z taśmą CFRP, przeprowadzone przez Langa [137], wykazały, że ścieżka równowagi „siła-odkształcenie” jest niemalże dokładnie liniowo-sprężysta.

Zatem dla naprężeń ścinających ważne jest równanie:

$$\tau_f = \frac{G_k}{t_k} \cdot s \quad (3.127)$$

gdzie: G_k - moduł sprężystości poprzecznej spoiny klejowej,
 t_k - grubość warstwy kleju

$$\gamma_k = \operatorname{tg} \left(\frac{s}{t_k} \right) \approx \frac{s}{t_k} \quad (3.128)$$

$$\tau_f = \gamma_k \cdot G_k \quad (3.129)$$

$$s'' - \omega^2 \cdot s = 0 \quad (3.130)$$

$$\omega^2 = 2 \cdot \frac{G_k (1 + \alpha_f \cdot \rho_f)}{t_k \cdot E_f \cdot t_f} \quad (3.131)$$

Rozwiązanie równania różniczkowego przyjmuje postać:

$$s(x) = A \sinh(\omega \cdot x) + B \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.132)$$

Wyznaczając stałe A i B na podstawie warunków brzegowych:

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad N_w = 0, N_{fc} = 0$$

$$x = l \quad \rightarrow \quad N_w = -F, N_{fc} = F$$

Zależność pomiędzy naprężeniem a poślizgiem można zapisać:

$$s(x) = \frac{F \cdot \omega \cdot t_k}{2 \cdot G_k \cdot b_f \cdot \sinh(\omega \cdot l)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.133)$$

Ostatecznie dla naprężeń ścinających otrzymano:

$$\tau_f(x) = \frac{F \cdot \omega}{2 \cdot b_f \cdot \sinh(\omega \cdot l)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.134)$$

żeby opisać równanie (3.133) w kategoriach mechaniki i uzyskać numeryczną wartość k - „poziomu sztywności na ścinanie” należy przeanalizować wyrażenie:

$$k = \frac{G_k}{t_k} \quad (3.135)$$

Z badań ścinania wynika, że wartość k można oszacować z przedstawionego równania różniczkowego (3.133), określającego poślizg taśmy CFRP. Dla poślizgu uzyskano (dla $x=l$):

$$s(x=l) = \frac{F \cdot \sqrt{\frac{2k(1 + \alpha_f \cdot \rho_f)}{E_f \cdot t_f}} \cdot \operatorname{ctgh}\left(\sqrt{\frac{2k(1 + \alpha_f \cdot \rho_f)}{E_f \cdot t_f}} \cdot l\right)}{2 \cdot k \cdot b_f} \quad (3.136)$$

W [15] Bergmeister i Luggin przedstawili również model analityczny dla zginanej drewnianej belki wzmocnionej sprężoną taśmą CFRP na podstawie [233] - rozdz. 3.8.1.

Analizę matematyczną naprężeń w warstwie kleju, przeprowadzono posługując się równaniem różniczkowym więzi poślizgowej. Założono, że maksymalne siły sprężające zależą od charakterystyk materiałowych kleju, taśm CFRP oraz drewna w równym stopniu jak od charakterystyk geometrycznych taśm CFRP oraz belki drewnianej.

Poczyniono także następujące uproszczenia:

- przed zniszczeniem taśmy CFRP oraz belka drewniana wykazują liniowe charakterystyki materiałowe,
- klej ulega deformacji głównie w wyniku ścinania,
- naprężenia normalne wszystkich elementów przekroju są rozłożone regularnie w ich przekrojach poprzecznych,
- cała deformacja zachodzi tylko w warstwie kleju, belkę drewnianą traktuje się jako niepodatną.

Wtedy dla $0 \leq x \leq l/2$:

$$\tau_k(x) = \frac{G_k \cdot \sigma_f^{(0)} \cdot \sinh(\omega_2 \cdot x)}{\cosh\left(\omega_2 \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot \omega_2 \cdot t_k \cdot E_f} \quad (3.137)$$

$$\sigma_f(x) = \frac{G_k \cdot \sigma_f^{(0)} \cdot \sinh(\omega_2 \cdot x)}{\omega_2^2 \cdot t_k \cdot t_f \cdot E_f} \left(1 - \frac{\cosh(\omega_2 \cdot x)}{\cosh\left(\omega_2 \cdot \frac{1}{2}\right)} \right) \quad (3.138)$$

3.8.3. Model zaproponowany przez J. Jasińko

W wyniku przeprowadzonych badań stalowych prętów klejanych (opisanych w [113]) stwierdzono, że największy wpływ na długość zakotwienia ma granica plastyczności użytej stali oraz - trudna do jednoznacznego wyznaczenia - „ogólna” wytrzymałość drewna. Opierając się na założeniu, że chwilę zniszczenia determinują oba te czynniki jednocześnie, zaproponowano następującą, półempiryczną, postać wyrażenia na długość zakotwienia (słuszną jedynie dla średnic prętów 10÷20 mm i grubości spoin 1÷2 mm):

$$l_z = \frac{R_e}{4 \cdot K_x} \cdot \frac{d_p}{d_o} \cdot f \quad (3.139)$$

gdzie: l_z - długość zakotwienia,
 R_e - granica plastyczności użytej stali,
 d_p - średnica pręta,
 d_o - średnica otworu,
 f - współczynnik koncentracji naprężeń ($f = 1,4 \div 1,8$),
 K_x - „ogólna wytrzymałość drewna, określona wzorem:

$$K_x = \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (3.140)$$

gdzie: K_1 - wytrzymałość na ścinanie wzdłuż włókien,
 K_2 - wytrzymałość na rozciąganie w kierunku prostopadłym do włókien,

Dla zaproponowanego modelu liniowego z częścią nieliniową, wg modelu Shunshenga, funkcja do opisu naprężeń ścinających ma postać:

$$\tau_k(x) = \frac{G}{t} \cdot u(x) + (C_3 \cdot x^2 + C_4) + C_5 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{l_z}\right) \quad (3.141)$$

gdzie: C_3, C_4, C_5 - stałe

Ostatecznie po przyjęciu warunków brzegowych oraz po wykonaniu przekształceń otrzymano następującą postać równania, opisującego rozkład naprężeń na długości zakotwienia:

$$\tau_k(x) = \frac{F}{E_s A_s} \frac{G}{t \lambda} \frac{\cosh(\lambda l_z) - \cosh(\lambda x) - [\cosh(\lambda l_z) - 1] \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{l_z}\right)}{\lambda l_z \cosh(\lambda l_z) - \sinh(\lambda l_z) - 2 \lambda l_z \frac{\cosh(\lambda l_z) - 1}{\pi}} \quad (3.142)$$

- gdzie: x - współrzędna na długości zakotwienia względem lica początku połączenia,
 F - wartość przyłożonej siły wyrywającej,
 E_s - moduł sprężystości materiału pręta,
 A_s - powierzchnia przekroju pręta.

$$\lambda^2 = \alpha \frac{G}{t} \quad (3.143)$$

$$\alpha = \frac{\left(1 + \frac{E_s}{E_d} \cdot \frac{A_s}{A_d}\right) \pi d_p}{E_s A_s} \quad (3.144)$$

- gdzie: x - współrzędna na długości zakotwienia względem lica początku połączenia,
 E_d - moduł sprężystości drewna (wzdłuż włókien),
 A_d - powierzchnia przekroju poprzecznego pręta,

W zaproponowanym modelu uproszczonym opartym na zależnościach przestrzennych przyjęto następujące założenia:

- materiały elementów łączonych spełniają prawo Hooke'a,
- grubość spoiny oraz jej powierzchnia przekroju są pomijalnie małe,
- naprężenia ścinające na grubości warstwy klejowej są stałe,
- nie występuje zginanie elementów łączonych,
- model połączenia jest osiowo-symetryczny.

Do opisu naprężeń ścinających τ_k w spoinie przyjęto następującą funkcję

$$\tau_k(x) = g(x) \cdot \sigma_s(x) \quad (3.145)$$

- gdzie: $g(x)$ - parametr spiętrzenia naprężeń - liniowa funkcja współrzędnej x ,

Ostatecznie po uwzględnieniu warunków brzegowych i po przekształceniach otrzymano:

$$\tau_k(x) = x \cdot \frac{d_p^2}{l_z} \cdot \frac{E_s}{E_d} \cdot \frac{R_v \cdot \pi}{A_{dp}} \cdot e^{-2 \cdot x^2 \cdot \frac{d_p}{l_z} \cdot \frac{E_s}{E_d} \cdot \frac{A_s}{A_{dp}} \cdot \frac{R_v \cdot \pi}{F}} \quad (3.146)$$

- gdzie: A_{dp} - współpracująca powierzchnia przekroju drewna,
 R_v - średnie naprężenie ścinające niszczące połączenie klejowe.

4. BADANIA WŁASNE

4.1. BADANIA PILOTAŻOWE

4.1.1. Cel i program badań pilotażowych

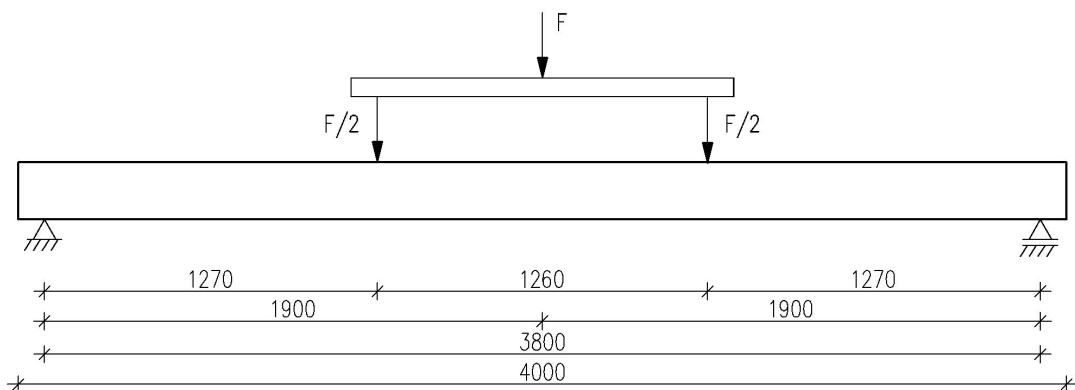
Badania przeprowadzono w laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Przedmiotem badań były drewniane belki stropowe wzmocnione, na całej długości, taśmami z włókien węglowych Sika CarboDur, [115], [116], [109], [171].

Celem badań pilotażowych było ustalenie zakresu możliwych do uzyskania efektów wzmocnienia, obserwacja wpływów technologicznych oraz ustalenie parametrów procedur badawczych dla dalszych badań, ważnych z naukowego punktu widzenia.

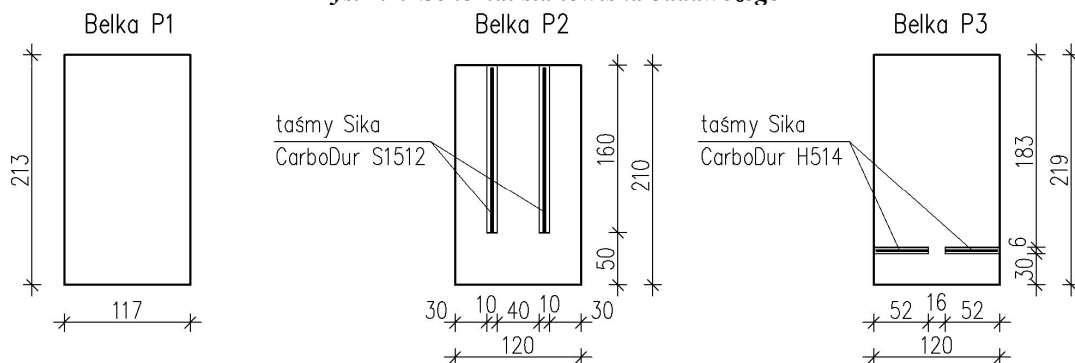
Badanymi elementami były 3 ok. 100 letnie, sosnowe belki stropowe: belka P1 - świadkowa (niewzmocniona), belka P2 - wzmocniona taśmami Sika CarboDur S1512 oraz belka P3 - wzmocniona taśmami Sika CarboDur H514. Specyfikację taśm podano w tab. 4.1, [94], [155], [227]. Wymiary badanych elementów oraz sposoby wzmocnienia przedstawiono na rys. 4.1 i 4.2.

Tab. 4.1. Dane techniczne zastosowanych taśm Sika CarboDur

Rodzaj taśmy		Sika CarboDur S1512	Sika CarboDur H514
Szerokość taśmy b_f	[mm]	150	50
Grubość taśmy t_f	[mm]	1,2	1,4
Moduł Younga E	[GPa]	> 165	> 300
Wytrzymałość na rozciąganie f_{ft}	[MPa]	> 2800	> 1300
Odształcenie przy zerwaniu ϵ_f	[%]	> 1,7	> 0,45
Gęstość ρ_f	[g/cm ³]	1,5	1,6
Zawartość objętościowa włókien	[%]	> 68	



Rys. 4.1. Schemat stanowiska badawczego

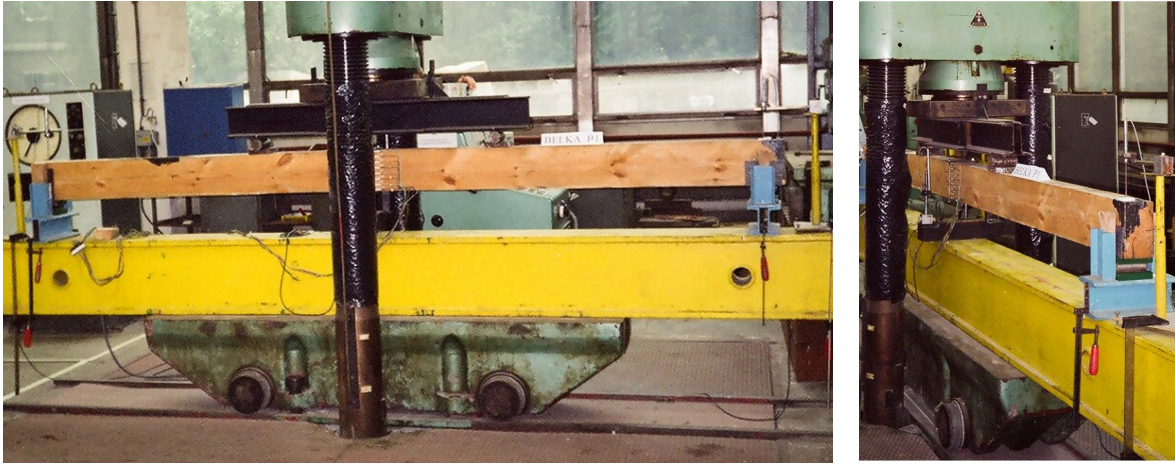


Rys. 4.2. Przekroje poprzeczne badanych belek

Do wklejania taśm użyto kleju na bazie żywicy epoksydowej o następującym składzie:

- Epidian 5 - 100 cz. w.
- cement 32,5 - 185 cz. w.
- utwardzacz Z-1 - 11 cz. w.
- ftalan dwubutylu - 5 cz. w.

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 4.1 i 4.3. Każdy z modeli badany był przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu DR MB-600. Badane elementy zostały umieszczone na podporach: przegubowo-przesuwnej oraz przegubowo-nieprzesuwnej. Na podporach zastosowano podparcie widełkowe, rys 4.3.

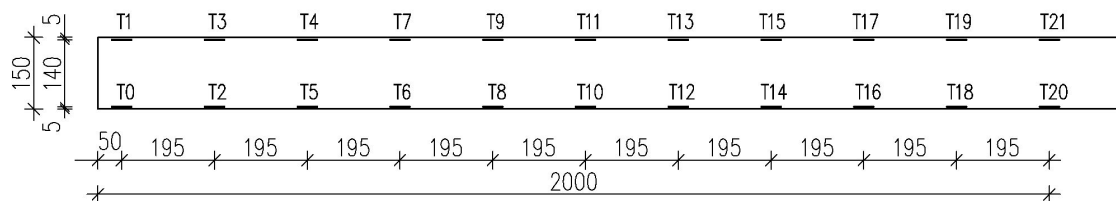


Rys. 4.3. Widok stanowiska badawczego

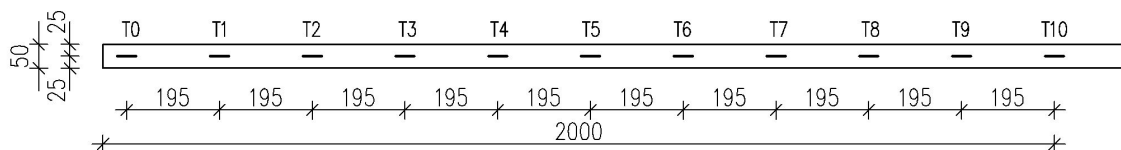
Belki poddawano czteropunktowemu zginaniu. Podczas badania rejestrowano:

- wartość siły obciążającej - za pomocą zestawu komputerowego,
- przemieszczenie belki w środku oraz na podporach- czujniki indukcyjne,
- odkształcenia przekroju drewna - tensometry elektrooporowe typu RL 300/50,
- odkształcenia taśmy - tensometry elektrooporowe typu RL 120/20,
- wartość siły niszczącej - rejestracja komputerowa, dla sprawdzenia manometr maszyny wytrzymałościowej,
- sposób zniszczenia - opis i dokumentacja fotograficzna.

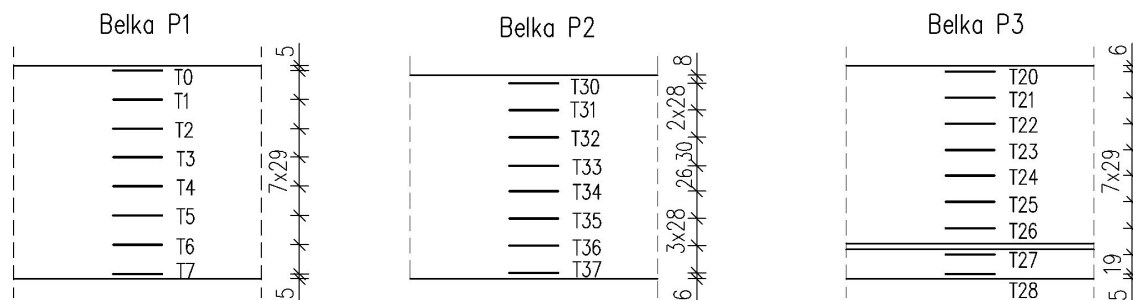
Rozmieszczenie tensometrów na taśmach i drewnie pokazano na rys. 4.4, 4.5, 4.6.



Rys. 4.4. Rozmieszczenie tensometrów na taśmie w belce P2
(tensometry naklejone na połowie jednej taśmy)



Rys. 4.5. Rozmieszczenie tensometrów na taśmie w belce P3
(tensometry naklejone na połowie jednej taśmy)



Rys. 4.6. Rozmieszczenie tensometrów na drewnie w środku rozpiętości belki

4.1.2. Wyniki badań pilotażowych

Wilgotność drewna w trakcie badania kontrolowano za pomocą wilgotnościomierza WRD-20. Przeprowadzono ponadto badania materiałowe drewna na małych próbkach bez wad wg procedur normowych, [184], [187], [188]. Dla badanych próbek średnia wilgotność wynosiła 14,5%. Badania materiałowe drewna zostały przeprowadzone na prasie uniwersalnej ZDM 5/91, zaś kleju (na podstawie normy PN-EN 196-1) na prasie hydraulicznej ZD-40. Więcej informacji na temat procedur badawczych i kształtów próbek zawarto w rozdz. 4.2. Wyniki badań materiałowych dla kleju i drewna zamieszczono w tab. 4.2 i 4.3. Moduł sprężystości na zginanie (7800 MPa) oznaczono, na podstawie ścieżki równowagi belki P1.

Tab. 4.2. Wytrzymałości drewna, próbek modelowych

Wytrzymałość na:	Średnia arytmetyczna f_{sr} [MPa]	Liczba próbek n [szt.]	Odchylenie standard. s [MPa]	Błąd średni s_r [MPa]	Wsp. zmienności n [%]	Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p [%]
Ściskanie $f_{c,0}$	43,1	10	0,8	0,3	1,83	1,16
Zginanie f_m	63,9	10	6,0	1,9	9,37	5,92
Ścinanie $f_{v,0}$	4,9	9	1,0	0,3	20,32	13,90

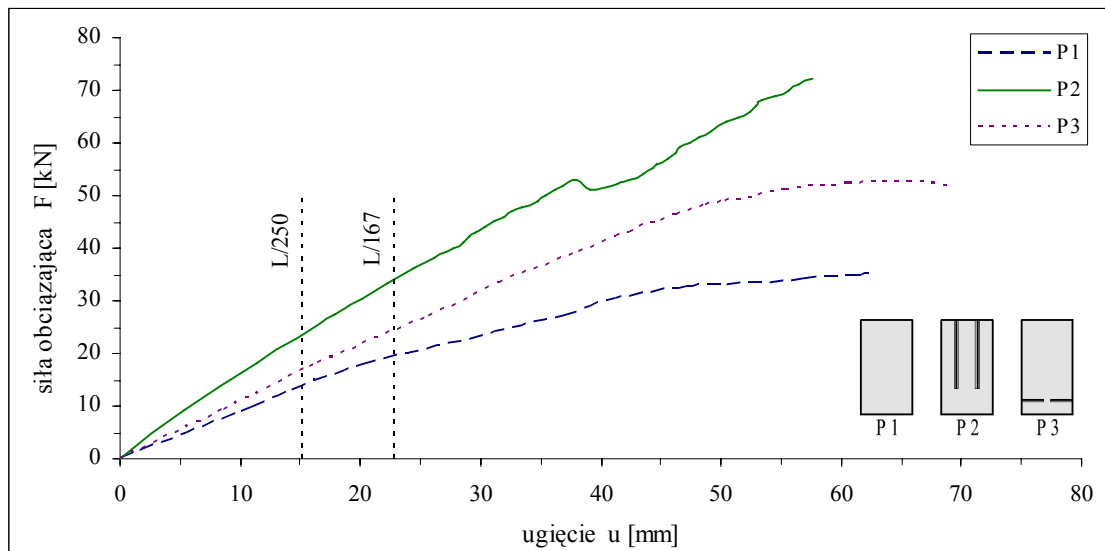
Tab. 4.3. Wytrzymałości kleju

Wytrzymałość na:	Średnia arytmetyczna f_{sr} [MPa]	Liczba próbek n [szt.]	Odchylenie standard. s [MPa]	Błąd średni s_r [MPa]	Wsp. zmienności n [%]
Ściskanie f_c	98,6	12	5,6	1,6	1,64
Zginanie f_m	31,8	6	3,9	1,6	5,01

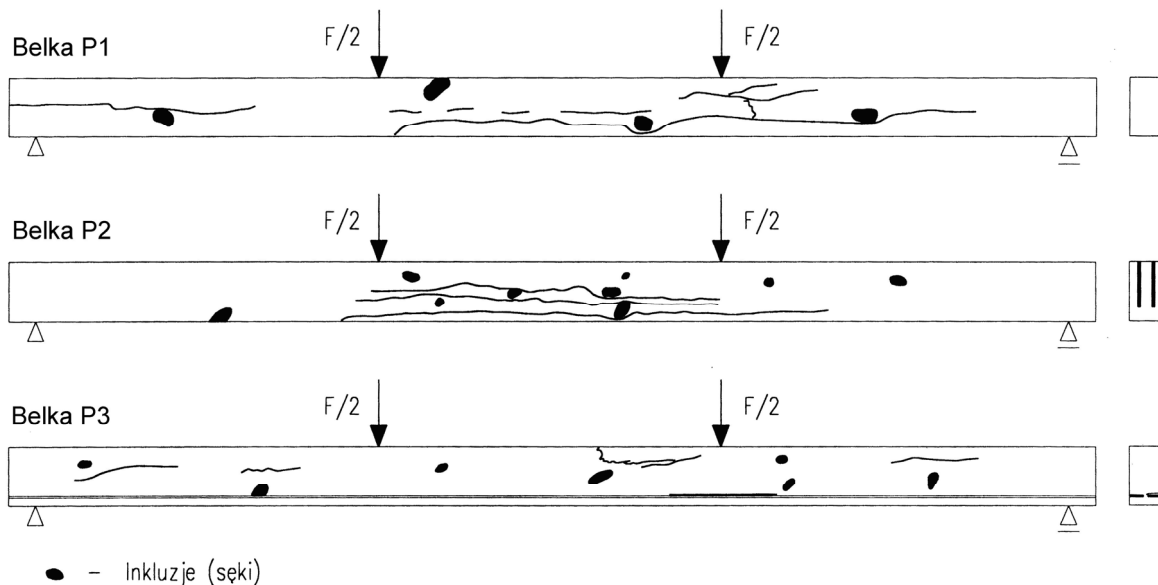
W tab. 4.4 zestawiono wartości siły niszczącej badanych belek oraz ugięcia dla jednakowego poziomu obciążenia - 30 kN. Na rys. 4.7 przedstawiono ścieżki równowagi badanych belek. Dodatkowo pokazano, liniami pionowymi, graniczne ugięcia $L/250$ dla stropów i $L/167$, czyli powiększone o 50% dla obiektów starych, remontowanych, wg [191].

Tab. 4.4. Wartości siły niszczącej oraz ugięcia badanych belek

		Belka		
		P1	P2	P3
Siła niszcząca F_n	[kN]	35,1	73,1	52,7
Ugięcie w środku rozpiętości przy obciążeniu $F=30$ kN u	[mm]	40,63	20,06	28,54



Rys. 4.7. Ścieżki równowagi dla badanych belek



Rys. 4.8. Przebieg zarysowań w badanych belkach ($F=0,8F_u$), widok od strony czujników elektrooporowych

Naprężenia normalne σ w drewnie oraz w taśmach z włókien węglowych wyznaczono wg wzoru:

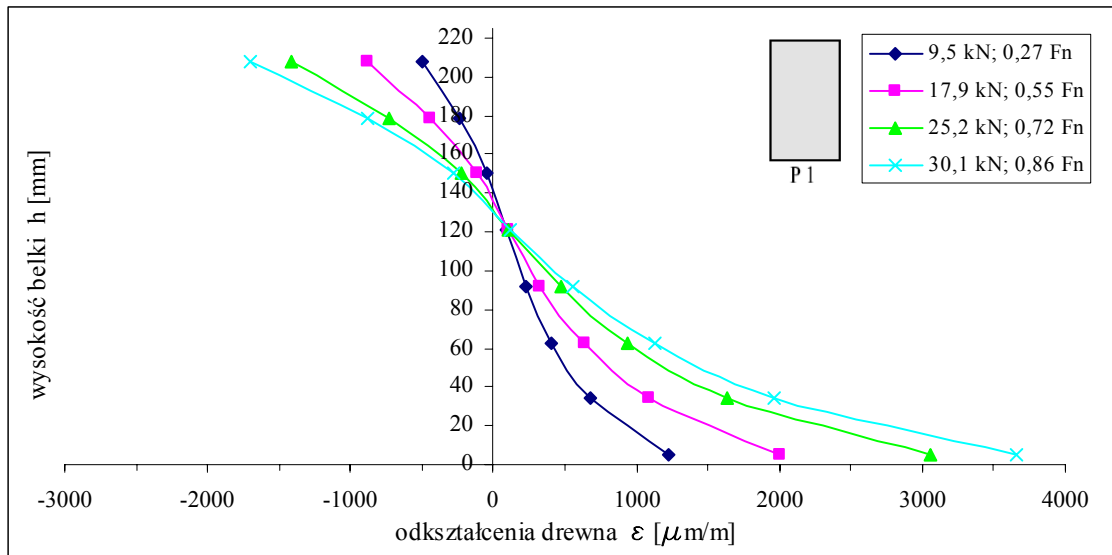
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \tag{4.1}$$

gdzie: σ - naprężenie normalne [MPa],
 ε - odkształcenie w drewnie lub taśmie [$\mu\text{m}/\text{m}$],
 E - moduł Younga [MPa],

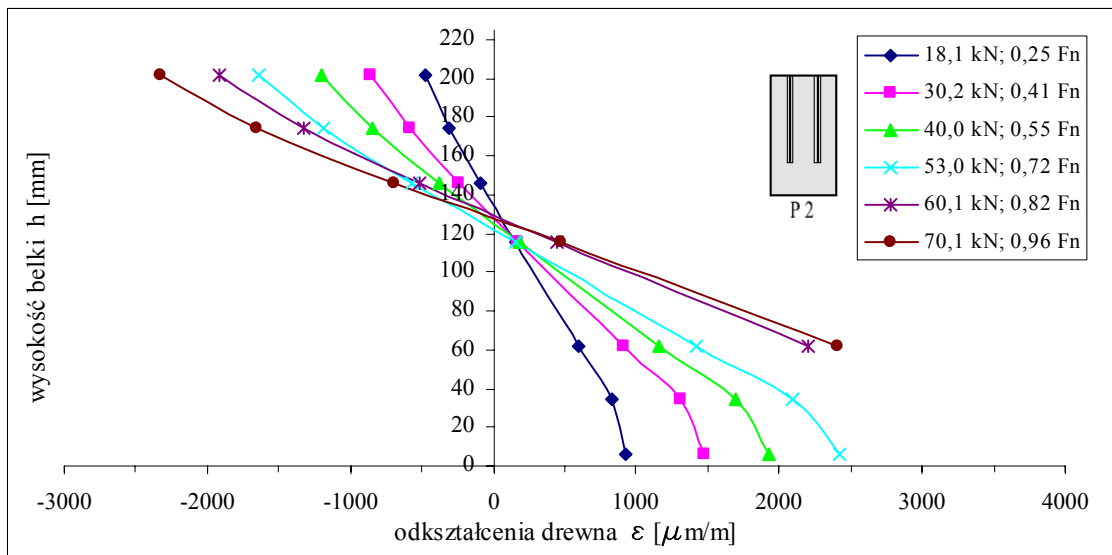
Naprężenia styczne τ w spoinie klejowej:

$$\tau = \frac{(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \cdot A_t}{A_s} \tag{4.2}$$

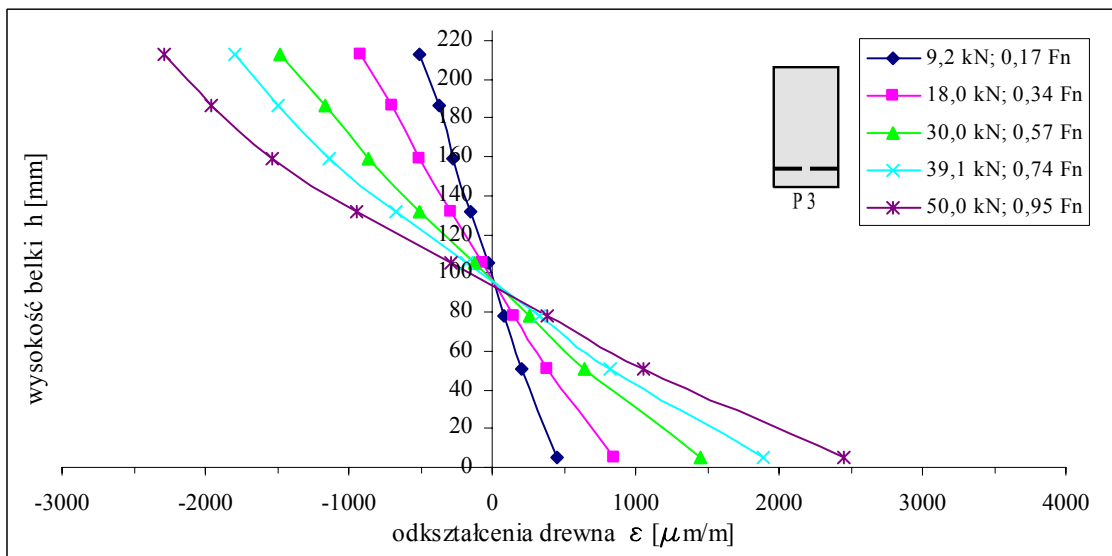
gdzie: τ - naprężenia styczne w spoinie [MPa],
 σ_i - naprężenie normalne w taśmie w punkcie i [MPa],
 σ_{i-1} - naprężenie normalne w taśmie w punkcie $i-1$ [MPa],
 A_t - pole powierzchni przekroju poprzecznego taśmy [mm^2],
 A_s - pole powierzchni ścinanej spoiny [mm^2].



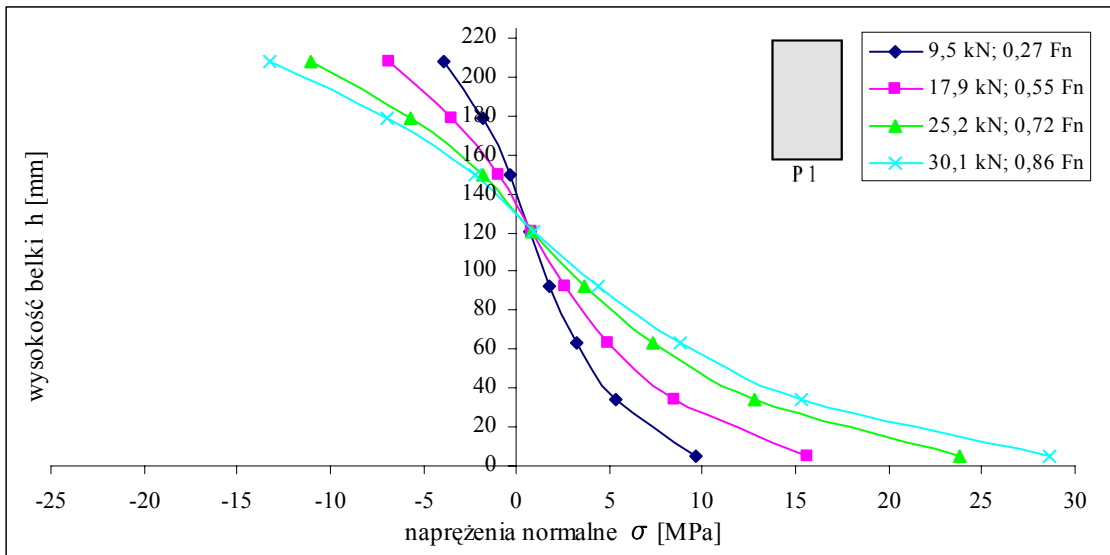
Rys. 4.9. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka P1



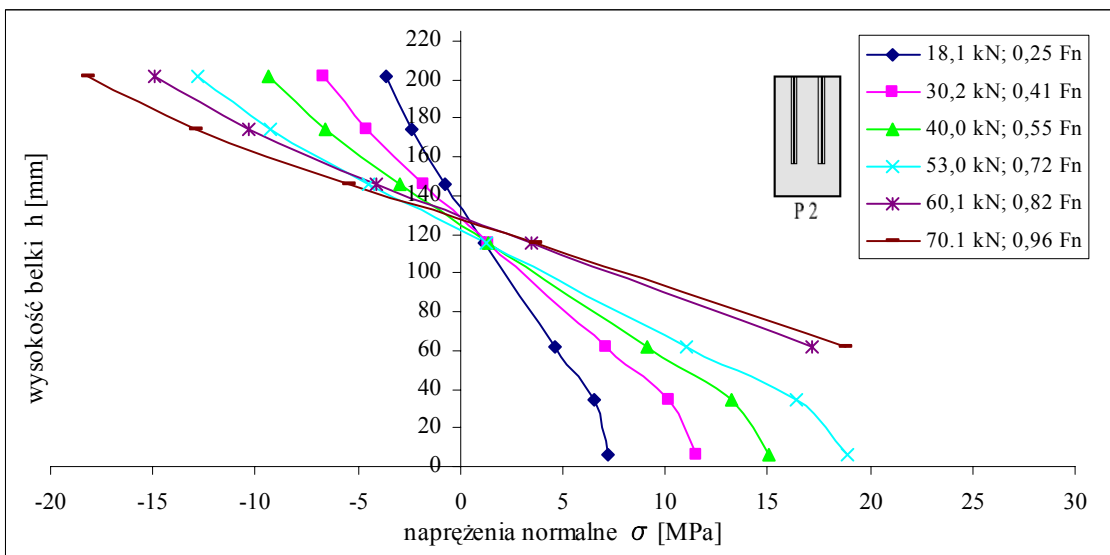
Rys. 4.10. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka P2



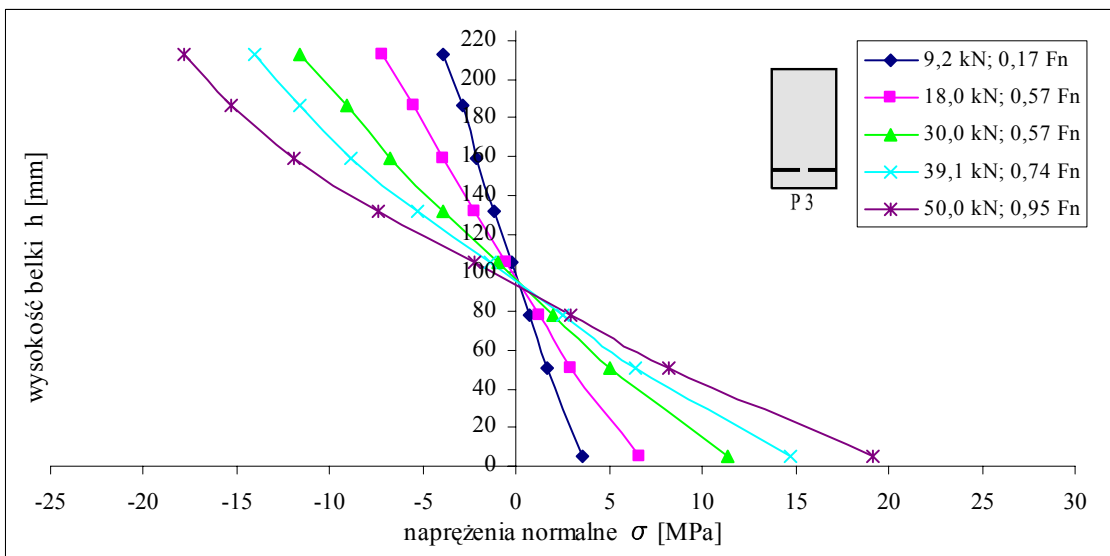
Rys. 4.11. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka P3



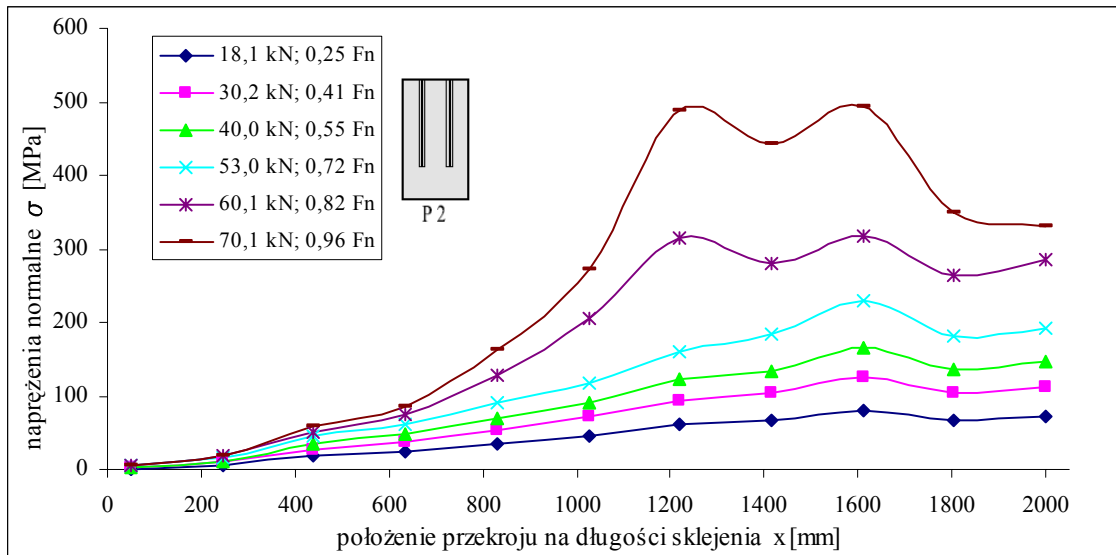
Rys. 4.12. Naprężenia normalne w drewnie - belka P1



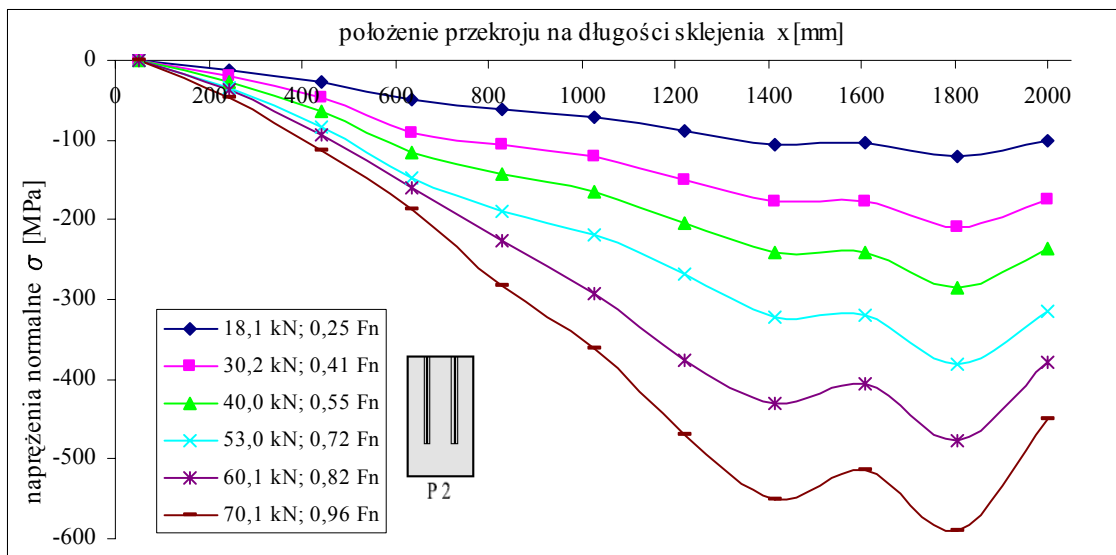
Rys. 4.13. Naprężenia normalne w drewnie - belka P2



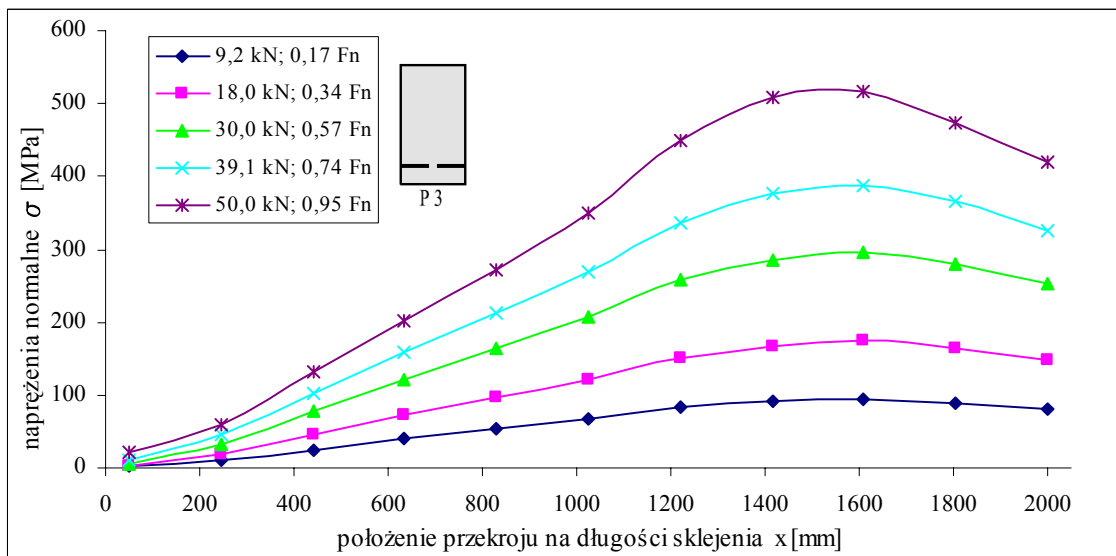
Rys. 4.14. Naprężenia normalne w drewnie - belka P3



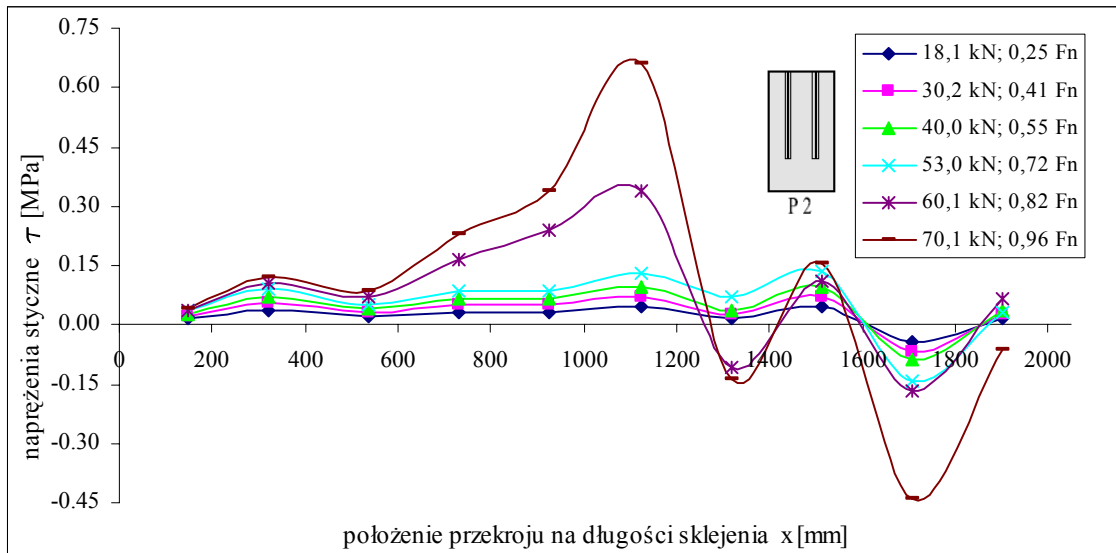
Rys. 4.15. Naprężenia normalne w dolnej części taśmy - belka P2



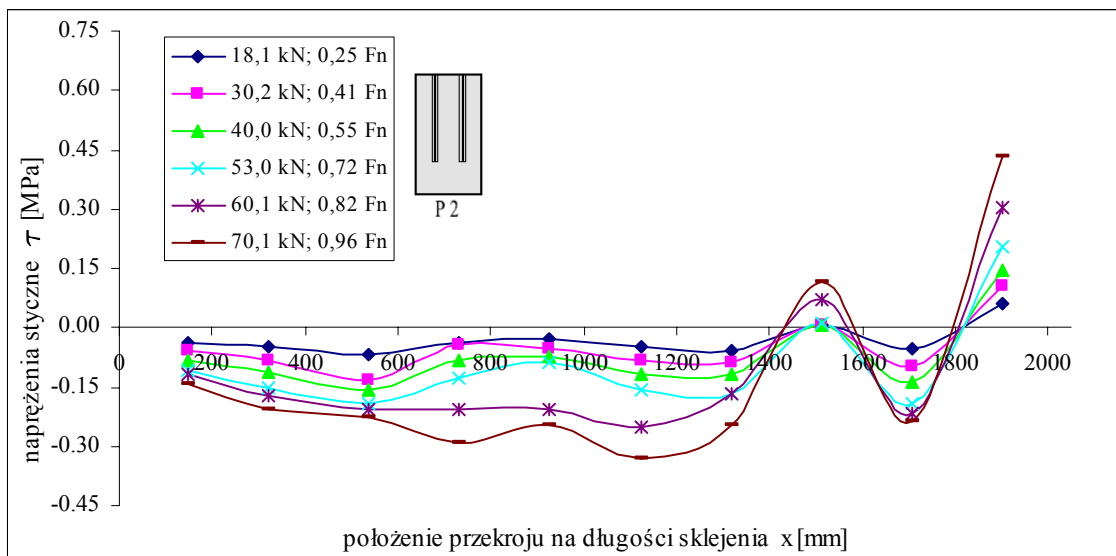
Rys. 4.16. Naprężenia normalne w górnej części taśmy - belka P2



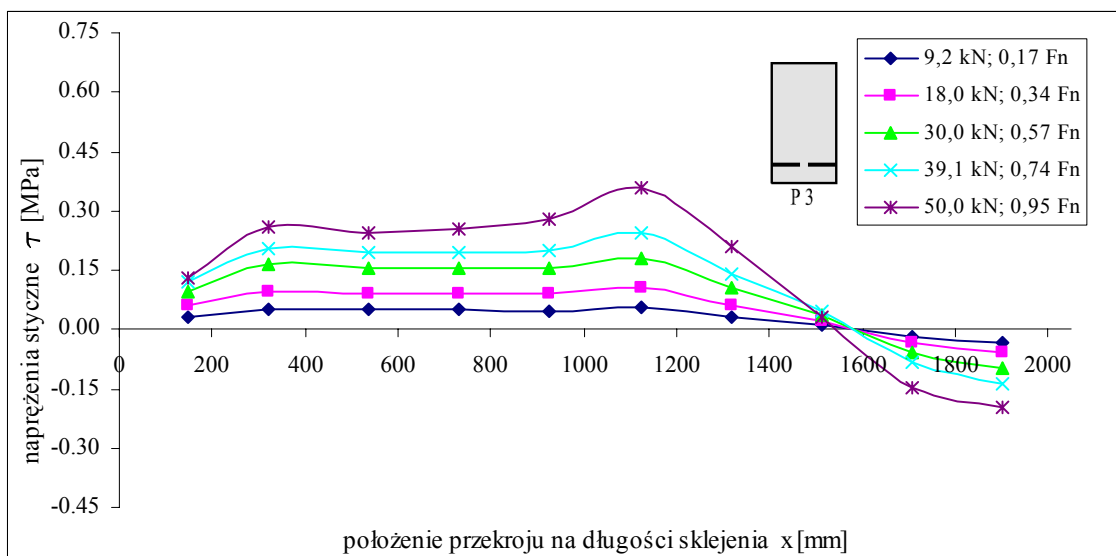
Rys. 4.17. Naprężenia normalne w taśmie - belka P3



Rys. 4.18. Naprężenia styczne w spoinie - dolna część taśmy w belce P2



Rys. 4.19. Naprężenia styczne w spoinie - górna część taśmy w belce P2



Rys. 4.20. Naprężenia styczne w spoinie - belka P3

4.1.3. Wnioski z przeprowadzonych badań pilotażowych

- 1) Przedmiotem, przeprowadzonych w 2001 roku, badań były belki wzmocnione taśmami z włókien węglowych wklejonymi w przekrój za pomocą kleju na bazie żywicy epoksydowej oraz belka świadkowa. Prawdopodobnie było to pierwsze tego typu badanie w Polsce. Wklejenie w przekrój wkładki wzmocniającej pozwala na wykorzystanie tej metody w pracach konserwatorskich.
- 2) Wzrost nośności dla belek zginanych P2 i P3 wyniósł odpowiednio 108% i 50%. Obciążenie jakie przeniosły odpowiednio belki P1, P2, P3 wyniosło 35,1 kN, 73,1 kN 52,7 kN.
- 3) Należy zwrócić uwagę na pozytywny wpływ wzmocnienia taśmami na ukierunkowanie struktury przekroju drewna w kierunku prostopadłym do zginania obserwowany w uzyskanych postaciach niszczenia belek w trakcie obciążania.
- 4) Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o dość dobrym wykorzystaniu nośności taśmy. Wyższe wyteżenie taśmy można uzyskać jedynie sprężając ją. Maksymalne wartości naprężeń normalnych w taśmie belki P2 to 487,58 MPa (przy wytrzymałości taśmy na rozciąganie 2800 MPa) oraz w belce P3 - 516,30 MPa (przy wytrzymałości taśmy na rozciąganie 1300 MPa).
- 5) W belce P2 uzyskano pożądaną mechanizm zniszczenia. Przy zniszczeniu nastąpiło rozwarstwianie włókien drewna belki. W belce P3 nastąpiło wyraźne rozwarstwienie na styku drewna i taśmy, na skutek nieciągłości spoiny.
- 6) Wartości odkształceń przekroju drewna, przy takim samym obciążeniu, były znacznie mniejsze dla belek wzmocnionych taśmami od odkształceń przekroju drewna belki świadkowej i to zarówno w strefie rozciąganej jak i ściskanej. Także ugięcia wzmocnionych belek były znacznie mniejsze. Wartości ugięć w środku rozpiętości belek P1, P2 i P3, przy obciążeniu 30 kN, wyniosły odpowiednio: 40,63 mm; 20,06 mm; 28,54 mm.
- 7) Przekrój zespolony „drewno - CFRP” pracował prawidłowo. Nośność przekroju zespolonego to wypadkowa nośności jego elementów składowych oraz ograniczenia wpływu anizotropowej budowy drewna poprzez wprowadzenie wkładek wzmocniających.
- 8) Wklejenie w przekrój belki taśm węglowych w znacznym stopniu ograniczyło wpływ nierównomierności usłojenia i inkluzji na nośność belki oraz na postać jej zniszczenia. Niewątpliwie własności mechaniczne drewna w kierunku prostopadłym do kierunku działania obciążenia zostały w przekroju zespolonym ujednoczone.
- 9) Z punktu widzenia teorii niezawodności model zniszczenia badanych połączeń powinien przybrać postać modelu szeregowego, tzn. o nośności przekroju po wzmocnieniu decydować powinno jego najsłabsze ogniwo. Przekrój zespolony „drewno-CFRP” jest przekrojem znacznie doskonalszym niż przekrój litego drewna na skutek wprowadzenia taśmy węglowej „uciągającej” nierównomierną strukturę drewna. Stąd najsłabszego ogniwa w łańcuchu należy szukać tu w strefach przyskleinowych w drewnie, co potwierdzają badania. Istnieje jednak możliwość modyfikacji struktury tych stref (np. impregnacja), co może prowadzić do wzrostu efektu wzmocnienia.
- 10) Szczególną uwagę należy zwrócić na staranność wykonania spoiny klejowej. W belce P3 nastąpiło wyraźne rozwarstwienie na styku drewna i taśmy, na skutek nieciągłości spoiny.

4.2. BADANIA MATERIAŁOWE

4.2.1. Cel i zakres badań materiałowych

Badania miały na celu określenie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna wzmocnianych belek oraz cech wytrzymałościowych materiałów zastosowanych do wykonania modeli badawczych: taśm CFRP - S&P Lammelle 150/2000 (50/1.2) i dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej - Resin 55.

W ramach badań materiałowych przeprowadzono:

- badania cech drewna, obejmujące oznaczenie:
 - wilgotności,
 - gęstości,
 - wytrzymałości na zginanie statyczne,
 - wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien,
 - wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien,
 - wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien,
 - wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien,
 - wytrzymałości na ścinanie,
 - modułu sprężystości przy zginaniu,
- badania kleju Resin 55, obejmujące oznaczenie:
 - wytrzymałości na zginanie kleju,
 - wytrzymałości na ściskanie kleju,
- badania taśm S&P Lammelle 150/2000 (50/1.2), obejmujące oznaczenie:
 - modułu sprężystości taśm na rozciąganie.

Ponadto wykonano badanie wytrzymałości połączenia klejowego „drewno - drewno” na ścinanie przy ściskaniu oraz badanie wytrzymałości połączenia „taśma CFRP - drewno” na odrywanie.

4.2.2. Badanie drewna

Badania cech wytrzymałościowych drewna można przeprowadzać wg [197] na elementach pełnowymiarowych lub na małych próbkach bez wad wg [184], [186], [187], [188], [189], [190]. Przy dużej liczbie próby (wg [196] min. 40 sztuk, natomiast bez wprowadzania żadnych współczynników poprawkowych - 200 sztuk) uzyskane wyniki uznaje się za miarodajne. Badania na pełnowymiarowych elementach wiążą się jednak z bardzo wysokimi kosztami. W związku z tym wg [197] podjęto jedynie próbę oznaczenia wytrzymałości na ścinanie oraz oszacowania modułu sprężystości przy zginaniu. Pozostałe cechy wytrzymałościowe drewna określono na podstawie badań na małych próbkach bez wad. Próbkę do badań zostały pobrane i przygotowane wg [185]. Procedury badawcze drewna szczegółowo opisane są m.in. [195] oraz w [125] i [136].

4.2.2.1. Oznaczenie wilgotności drewna

Oznaczenie wilgotności drewna metodą suszarkowo-wagową przeprowadzono wg [192] w dniu badania pierwszych wzmocnionych belek. Przy badaniu kolejnych belek wilgotność kontrolowano za pomocą wilgotnościomierza WRD-20 firmy Tanel.

Tab. 4.5. Wartości wilgotności drewna wg [192]

Kształt i wymiary próbki [mm]	belecza 20×20×300	
Liczba próbek n [szt.]	10	
Średnia wilgotność ω_{sr} [%]	10,60	
Odchylenie standardowe s [%]	0,12	
Błąd średni s_r [%]	0,04	
Współczynnik zmienności v [%]	1,15	
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p [%]	0,73	

4.2.2.2. Oznaczenie gęstości drewna

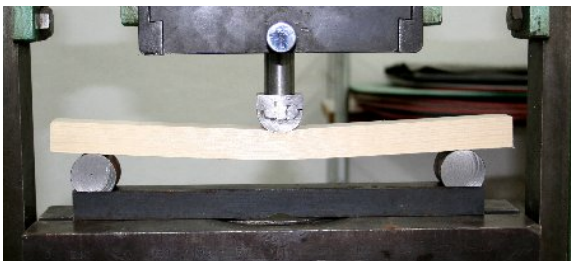
Gęstość drewna o wilgotności w chwili badania $\omega = 10,6\%$ została oznaczona na podstawie [183].

Tab. 4.6. Wartości gęstości drewna o wilgotności ω wg [183]

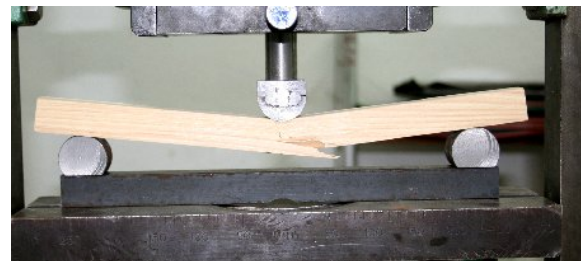
Kształt i wymiary próbki [mm]	prostokątów 20×20×30	
Liczba próbek n [szt.]	10	
Średnia gęstość ρ_{sr} [kg/m ³]	410	
Średnia gęstość ρ_{sr} ($\omega=12\%$) [kg/m ³]	414	
Odchylenie standardowe s [kg/m ³]	4,8	
Błąd średni s_r [kg/m ³]	1,5	
Współczynnik zmienności v [%]	1,17	
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p [%]	0,74	

4.2.2.3. Oznaczenie wytrzymałości na zginanie statyczne

Wytrzymałość drewna na zginanie statyczne określono na podstawie badań przeprowadzonych wg [184] przy użyciu prasy mechanicznej uniwersalnej ZDM 5/91.



Rys. 4.21. Badanie wytrzymałości na zginanie drewna



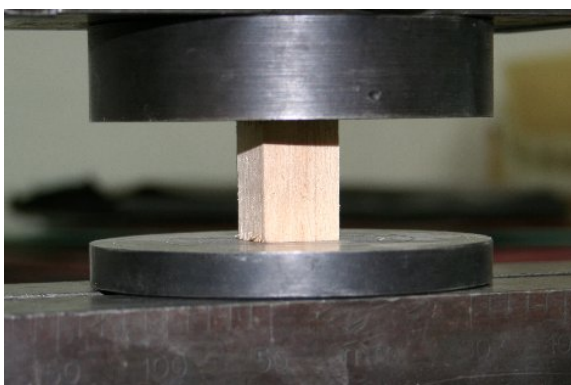
Rys. 4.22. Badanie wytrzymałości na zginanie drewna - przykład zniszczenia próbki

Tab. 4.7. Wartości wytrzymałości na zginanie statyczne drewna wg [184]

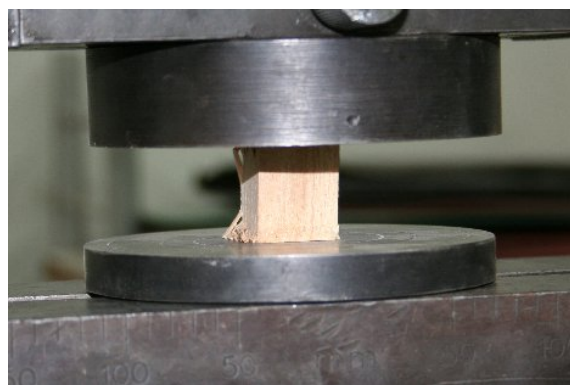
Kształt i wymiary próbki [mm]	belecza 20×20×300	
Liczba próbek n	[szt.]	36
Średnia wytrzymałość na zginanie $f_{m,śr}$	[MPa]	69,2
Średnia wytrzymałość na zginanie $f_{m,śr}$ ($\omega=12\%$)	[MPa]	65,3
Odchylenie standardowe s	[MPa]	6,0
Błąd średni s_r	[MPa]	1,2
Współczynnik zmienności v	[%]	8,72
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	3,56

4.2.2.4. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien

Wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien określono na podstawie badań przeprowadzonych wg [187] również przy użyciu prasy mechanicznej uniwersalnej ZDM 5/91.



Rys. 4.23. Badanie wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien



Rys. 4.24. Badanie wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien - przykład zniszczenia próbki

Tab. 4.8. Wartości wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien wg [187]

Kształt i wymiary próbki [mm]	prostopadłościan 20×20×30	
Liczba próbek n	[szt.]	30
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,0,śr}$	[MPa]	40,8
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,0,śr}$ ($\omega=12\%$)	[MPa]	38,5
Odchylenie standardowe s	[MPa]	3,7
Błąd średni s_r	[MPa]	0,7
Współczynnik zmienności v	[%]	8,96
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	3,27

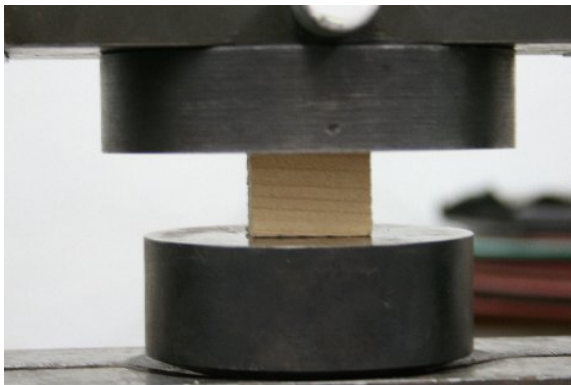
4.2.2.5. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien.

Wytrzymałość drewna na ściskanie w poprzek włókien określono na podstawie badań przeprowadzonych wg [186] na prasie mechanicznej, uniwersalnej ZDM 5/91. Wytrzymałość w kierunku promieniowym jest wyższa niż w kierunku stycznym ze względu na licznie reprezentowane i silnie rozbudowane promienie rdzeniowe, [136].

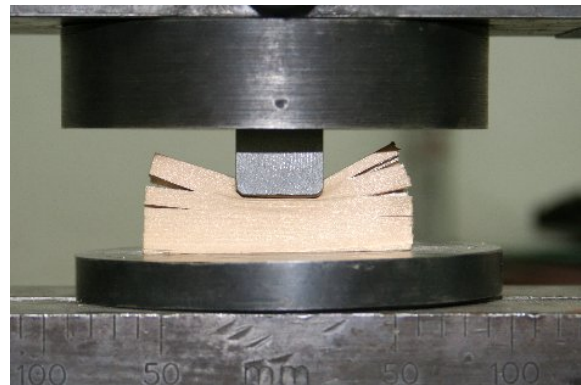
Wytrzymałość przyjęta jako reprezentatywna jest średnią arytmetyczną z badań w dwóch kierunkach.

Tab. 4.9. Wartości wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien wg [186]

Kształt i wymiary próbki [mm]	[mm]	prostopadłościان	
		20×20×30	20×20×60
Liczba próbek n	[szt.]	30	30
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,90,sr}$	[MPa]	7,8	
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,90,sr} (\omega=12\%)$	[MPa]	7,5	
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,8	
Błąd średni s_r	[MPa]	0,2	
Współczynnik zmienności v	[%]	10,68	
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	4,36	



Rys. 4.25. Badanie wytrzymałości drewna na ściskanie w poprzek włókien, ściskanie całej powierzchni



Rys. 4.26. Badanie wytrzymałości drewna na ściskanie w poprzek włókien, ściskanie części powierzchni - przykład zniszczenia próbki

4.2.2.6. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien

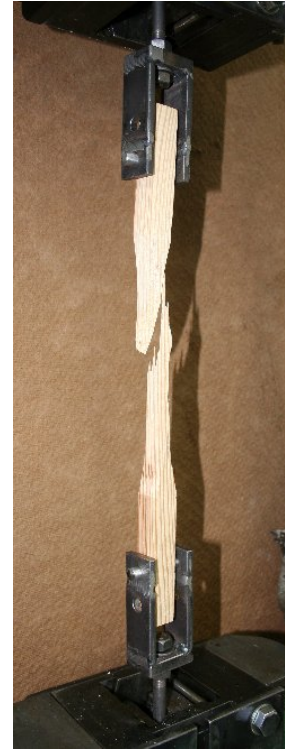
Wytrzymałość drewna na rozciąganie wzdłuż włókien określono na podstawie badań przeprowadzonych wg [189] na prasie mechanicznej uniwersalnej ZDM 5/91.

Tab. 4.10. Wartości wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien drewna wg [189]

Kształt i wymiary próbki [mm]	[mm]	
Liczba próbek n	[szt.]	16
Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{t,0,sr}$	[MPa]	80,5
Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{t,0,sr} (\omega=12\%)$	[MPa]	78,8
Odchylenie standardowe s	[MPa]	8,9
Błąd średni s_r	[MPa]	2,2
Współczynnik zmienności v	[%]	11,11
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	5,55



Rys. 4.27. Badanie wytrzymałości drewna na rozciąganie wzdłuż włókien



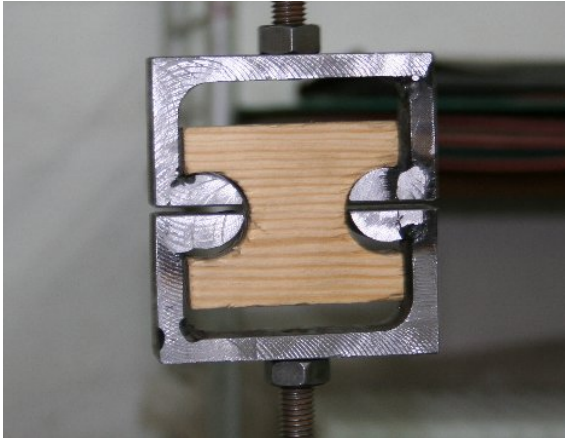
Rys. 4.28. Badanie wytrzymałości drewna na rozciąganie wzdłuż włókien - przykład zniszczenia próbki

4.2.2.7. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien

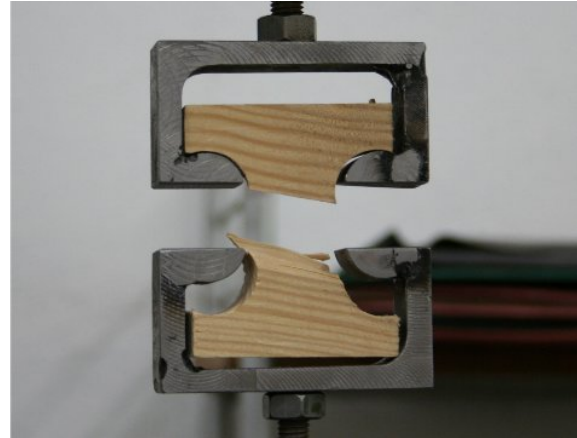
Wytrzymałość drewna na rozciąganie w poprzek włókien określono na podstawie badań przeprowadzonych wg [190] na prasie mechanicznej uniwersalnej ZDM 5/91.

Tab. 4.11. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien drewna wg [190]

Kształt i wymiary próbki [mm]		
Liczba próbek n	[szt.]	16
Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{t,90,sr}$	[MPa]	3,8
Średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{t,90,sr} (\omega=12\%)$	[MPa]	3,7
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,5
Błąd średni s_r	[MPa]	0,1
Współczynnik zmienności ν	[%]	12,49
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	6,24



Rys. 4.29. Badanie wytrzymałości drewna na rozciąganie w poprzek włókien



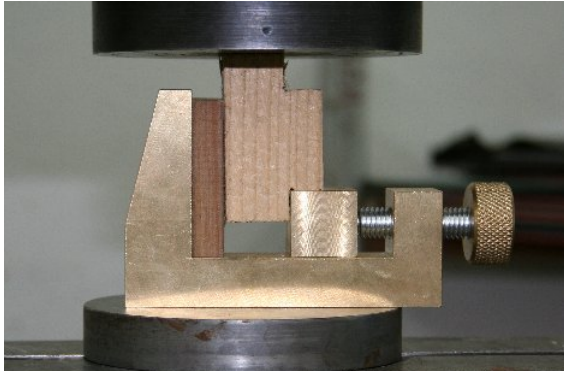
Rys. 4.30. Badanie wytrzymałości drewna na rozciąganie w poprzek włókien - przykład zniszczenia próbki

4.2.2.8. Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien

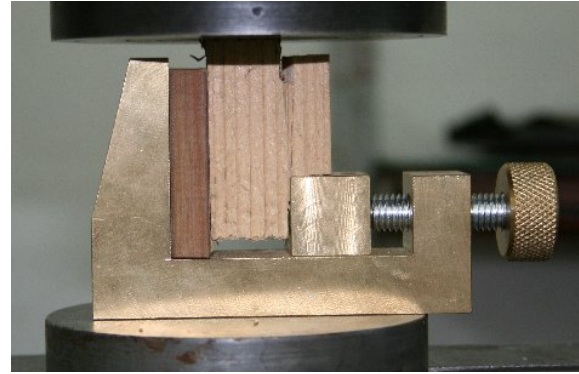
Wytrzymałość drewna na ścinanie wzdłuż włókien określono na podstawie badań wg [188] i [197] przeprowadzonych odpowiednio na prasach mechanicznych, uniwersalnych ZDM 5/91 i ZDM 10/91. Do wykonania próbek wg [197] (rys. 4.33, 4.34) użyto dwuskładnikowego kleju epoksydowego Resin 55. Zniszczenie zawsze następowało w drewnie, poprzez ścięcie. W żadnej z 6 przeprowadzonych prób nie uległa zniszczeniu spoina kolejowa. Wytrzymałość badanego kleju na ścinanie była, zgodnie z założeniem, wyższa od wytrzymałości drewna na ścinanie wzdłuż włókien.

Tab. 4.12. Wartości wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien drewna wg [188]

Kształt i wymiary próbki [mm]		
Liczba próbek n	[szt.]	16
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,sr}$	[MPa]	6,5
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,sr}$ ($\omega=12\%$)	[MPa]	6,2
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,6
Błąd średni s_r	[MPa]	0,2
Współczynnik zmienności v	[%]	9,90
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	4,95



Rys. 4.31. Badanie wytrzymałości drewna na ścinanie wzdłuż włókien, wg [188]



Rys. 4.32. Badanie wytrzymałości drewna na ścinanie wzdłuż włókien, , wg [188] - przykład zniszczenia próbki

Tab. 4.13. Wartości wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien drewna wg [197]

Kształt i wymiary próbki [mm]		
Liczba próbek n	[szt.]	6
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,śr}$	[MPa]	6,0
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,śr}$ ($\omega=12\%$)	[MPa]	5,7
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,6
Błąd średni s_r	[MPa]	0,1
Współczynnik zmienności v	[%]	9,37
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	4,68



Rys. 4.33. Badanie wytrzymałości drewna na ścinanie wzdłuż włókien, wg [197]

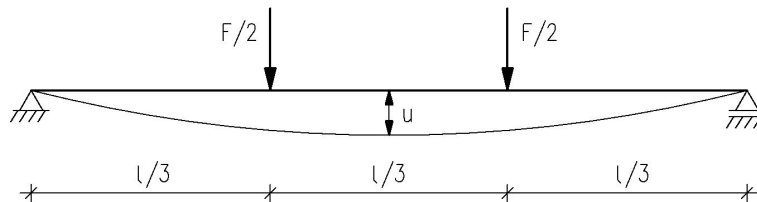


Rys. 4.34. Przykładowa próbka po zniszczeniu przy badaniu wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien drewna, wg [197]

4.2.2.9. Oznaczenie modułu sprężystości przy zginaniu

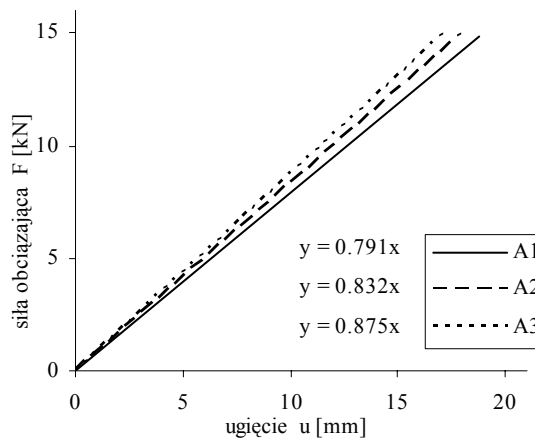
W przypadku określenia modułu sprężystości zrezygnowano z badań na małych próbkach bez wad wg [182] na rzecz badań pryzmatycznych modeli belek w skali technicznej (rozpiętość w osiach podpór: $l = 3800$ mm, wysokość $h = 220$ mm, szerokość $b = 120$ mm) wykonanych z nowego i starego drewna. Dla belki obciążonej jak na rys. 4.35 moduł sprężystości wyznaczono na podstawie wzoru (4.3).

$$E = \frac{23}{1296} \frac{F \cdot l^3}{u \cdot I_y} \quad (4.3)$$

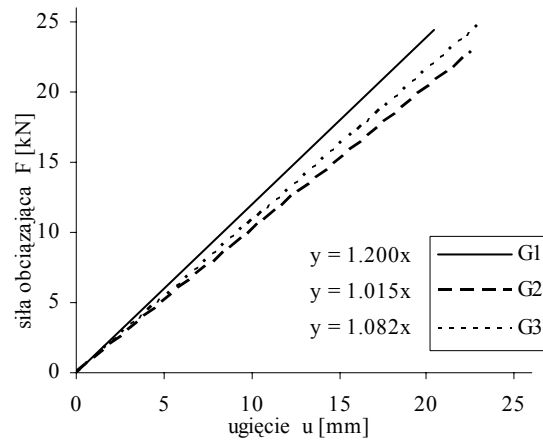


Rys. 4.35. Schemat obciążenia belki w badaniu modułu sprężystości

Wg [197] obciążenie maksymalne przyjmowane do analizy nie powinno przekraczać 40% wartości średniego obciążenia niszczonego dla badanych elementów - $0,4 F_{max}$. Do analizy wykorzystano linie trendu (regresji), wyznaczone na podstawie trzech ścieżek równowagi badanych belek świadkowych wykonanych z nowego (belki G1, G2, G3) i starego drewna (belki A1, A2, A3) dla przedziału obciążeń od $0,1 F_{max}$ do $0,4 F_{max}$ - rys. 4.36, 4.37. Współczynnik korelacji tych odcinków wykresów wynosił co najmniej 0,99.



Rys. 4.36. Wykresy „obciążenie-ugięcie” dla starego drewna w zakresie sprężystym



Rys. 4.37. Wykresy „obciążenie-ugięcie” dla nowego drewna w zakresie sprężystym

Tab. 4.14. Wartości modułu sprężystości przy zginaniu

	Nr belki	Moduł sprężystości E [MPa]	Średni moduł sprężystości E_{sr} [MPa]
DREWNO STARE	A1	7234	7615
	A2	7609	
	A3	8002	
DREWNO NOWE	G1	10974	10051
	G2	9283	
	G3	9895	

Ze względu na liczebność prób (po 3 przebadane elementy) przedstawione wyniki należy traktować jako orientacyjne. Ostatecznie, po analizie danych literaturowych i uzyskanych wyników badań, do dalszych rozważań przyjęto następujące wartości modułów sprężystości przy zginaniu:

- $E_d = 7600 \text{ MPa}$ dla drewna starego,
- $E_d = 10000 \text{ MPa}$ dla drewna nowego.

4.2.3. Badanie wytrzymałości kleju

4.2.3.1 Oznaczanie wytrzymałości kleju na zginanie

Badanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej Resin 55 przeprowadzono na prasie hydraulicznej ZD-40, wg [194]. Próbkę zostały przygotowane podczas wklejania taśm węglowych w przekroje drewniane, zaś oznaczenie wytrzymałości kleju na zginanie przeprowadzono po 14 dniach - w trakcie badania belek wzmocnionych taśmami CFRP.

Badanie wytrzymałości kleju na zginanie przeprowadzono na próbkach w kształcie prostopadłościanu (beleczkach) o wymiarach $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ - rys. 4.38.



Rys. 4.38. Badanie wytrzymałości kleju na zginanie wg [194]



Rys. 4.39. Badanie wytrzymałości kleju na ściskanie wg [194]

Tab. 4.15. Wyniki badań wytrzymałości kleju Resin 55 na zginanie wg [194]

Kształt i wymiary próbki	[mm]	beleczka 40×40×160
Liczba próbek n	[szt.]	9
Średnia wytrzymałość na zginanie $f_{m,śr}$	[MPa]	76,4
Odchylenie standardowe s	[MPa]	8,2
Błąd średni s_r	[MPa]	1,7
Współczynnik zmienności ν	[%]	10,73

4.2.3.2 Oznaczanie wytrzymałości kleju na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na częściach próbek złamanych w czasie badania wytrzymałości na zginanie. Części tych beleczek poddane były badaniom wytrzymałości na ściskanie po ułożeniu na bocznych powierzchniach o wymiarach $40 \times 40 \text{ mm}$ - rys. 4.39.

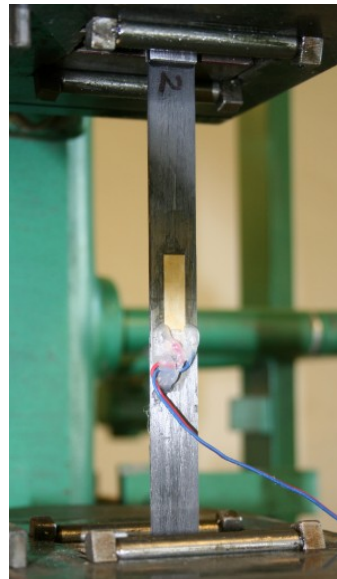
Tab. 4.16. Wyniki badań wytrzymałości kleju Resin 55 na ściskanie wg [194]

Kształt i wymiary próbki [mm]	powierzchnia ściskania 40×40
Liczba próbek n [szt.]	18
Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{c,śr}$ [MPa]	79,8
Odchylenie standardowe s [MPa]	3,4
Błąd średni s_r [MPa]	0,7
Współczynnik zmienności v [%]	4,31

4.2.4. Badanie taśm CFRP

4.2.4.1. Oznaczenie modułu sprężystości taśm na rozciąganie

Procedury badawcze cech wytrzymałościowych taśm kompozytowych jednokierunkowo wzmocnionych włóknami regulują normy [10], [198]. Z taśm S&P Lamelle CFK 150/2000 (o grubości 1,2 mm) przygotowano próbki o wymiarach 250×15. Na końcach próbek przyklejono za pomocą dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej Resin 55 po dwie podkładki aluminiowe (50×15×1,5 mm), umożliwiające zamocowanie ich w szczękach maszyny wytrzymałościowej (prasa mechaniczna uniwersalna ZDM 10/91). Tensometr elektrooporowy RL 120/20, do pomiaru odkształceń podłużnych, został umieszczony w połowie długości każdej z próbek - rys. 4.40. Moduł sprężystości taśm wyznaczono w przedziale od 0,1 do 0,4 wartości nominalnego naprężenia niszczonego.



Rys. 4.40. Próbkę taśmy w szczękach maszyny wytrzymałościowej ZDM 10/91

Tab. 4.17. Wyniki badań modułu sprężystości taśmy CFK 150/2000 przy rozciąganiu

Kształt i wymiary próbki [mm]	powierzchnia ściskania 40x40
Liczba próbek n [szt.]	6
Średni moduł sprężystości przy rozciąganiu taśmy $E_{f,śr}$ [GPa]	163,77
Odchylenie standardowe s [MPa]	2,99
Błąd średni s_r [MPa]	0,75
Współczynnik zmienności v [%]	1,81

Badania miały charakter weryfikacyjny. Otrzymana wartość modułu w badaniu - 163,8 GPa - jest zbliżona do wartości deklarowanej przez producenta - 165 GPa. W dalszych rozważaniach przyjęto więc tę drugą wartość.

Modułu sprężystości taśmy przy ściskaniu nie badano, ze względu na to, że zbrojenie CFRP miało zostać zastosowane jedynie jako zbrojenie strefy rozciąganej. Na podstawie wyników badań zamieszczonych w [30] i [230] - próba ściskania sklejonych ze sobą taśm - można stwierdzić, że właściwie nie ma różnicy w wartościach modułów taśmy przy ściskaniu i rozciąganiu.

4.2.5. Badanie wytrzymałości połączenia klejowego „taśma CFRP - drewno” na odrywanie

Badanie przyczepności taśmy doklejonej do drewna za pomocą kleju Resin 55 wykonano poprzez odrywanie krążka przyrządem DYNA Z15, wg [193]. We wszystkich badanych próbkach nastąpiło zniszczenie w warstwie drewna.

Tab. 4.18. Wyniki badań wytrzymałości taśmy na odrywanie od drewna

Kształt i wymiary próbki	[mm]	średnica odrywanego krążka - 50 mm
Liczba próbek n	[szt.]	6
Średnia wytrzymałość na odrywanie $f_{h,sr}$	[MPa]	2,64
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,22
Błąd średni s_r	[MPa]	0,05
Współczynnik zmienności ν	[%]	8,27



Rys. 4.41. Umieszczenie próbki w przyrządzie DYNA Z15 do wyznaczania wytrzymałości połączenia „drewno - klej - drewno” na odrywanie



Rys. 4.42. Próbką z naklejonym oraz oderwanym krążkiem do badania wytrzymałości połączenia „drewno - klej - drewno” na odrywanie

4.2.6. Badanie wytrzymałości połączenia klejowego „drewno - drewno” na ścinanie przy ściskaniu

Badanie wytrzymałości połączenia „drewno - klej - drewno” zrealizowano na prasie hydraulicznej ZD-40 przy użyciu próbek złożonych z trzech, sklejonych ze sobą za pomocą kleju Resin 55, drewnianych klocków, rys. 4.43. We wszystkich badanych próbkach zniszczenie nastąpiło poprzez ścięcie drewna wzdłuż włókien. W żadnej z 6 przeprowadzonych prób nie nastąpiło ścięcie spoiny klejowej. Przykładowa próbka po zniszczeniu została przedstawiona na rys. 4.44.



Rys. 4.43. Badanie wytrzymałości na ścinanie przy ściskaniu połączenia „drewno - klej - drewno”



Rys. 4.44. Przykładowa próbka po zniszczeniu przy próbie badania wytrzymałości na ścinanie przy ściskaniu połączenia „drewno - klej - drewno”

Tab. 4.19. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie przy ściskaniu połączenia „drewno - klej - drewno”

Kształt i wymiary próbki [mm]		
Liczba próbek n	[szt.]	6
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,śr}$	[MPa]	4,97
Średnia wytrzymałość na ścinanie $f_{v,śr} (\omega=12\%)$	[MPa]	4,75
Odchylenie standardowe s	[MPa]	0,71
Błąd średni s_r	[MPa]	0,18
Współczynnik zmienności v	[%]	14,27
Wskaźnik dokładności (dla $1-\alpha=0,95$) p	[%]	7,13

4.3. BADANIA LITYCH BELEK DREWNIANYCH WZMOCNIONYCH PRZY UŻYCIU CFRP

4.3.1. Opis badań

Przedmiotem badań było zastosowanie taśm węglowych CFRP do wzmocniania zginanych belek drewnianych obiektów zabytkowych. W programie badawczym zaproponowano wykorzystanie taśm węglowych do wzmocnienia i odtworzenia nośności belek z defektami - korozją biologiczną, inkluzje, skręt włókien, pęknięcia drewna.

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 4.1 i 4.45. Zastosowano siłownik o średnicy tłoka 100 cm² i maksymalnym wywieranym ciśnieniu 20 MPa firmy, VEB Werkzeugstoffprüfmaschine Leipzig oraz siłomierz ETP 7920-16 firmy, MOM Kalibergyár. Do rejestracji wyników użyto komputera PC oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

Podczas badania rejestrowano:

- wartość siły obciążającej - za pomocą zestawu komputerowego,
- przemieszczenie belki w środku oraz na podporach- czujniki indukcyjne,
- odkształcenia w drewnie - tensometry elektrooporowe typu RL 300/50,
- odkształcenia w taśmie - tensometry elektrooporowe typu RL 120/20,
- wartość siły niszczącej - rejestracja komputerowa, dla kontroli odczyty na manometrze maszyny wytrzymałościowej,
- sposób zniszczenia - opis i dokumentacja fotograficzna.

Belki w skali technicznej o długości 4 m i wymiarach przekroju 12×22 cm oparte zostały swobodnie na obu końcach. Rozpiętość belek w osiach podpór wynosiła 3,80 m. Obciążono je symetrycznie dwupunktowo siłą, dzięki czemu w środkowej części belki uzyskano czyste zginanie. Na podporach zastosowano podparcie widełkowe zapobiegające utracie stateczności giętej (zwichrzeniu).



Rys. 4.45. Widok stanowiska badawczego

Badano 21 ok. stuletnich sosnowych belek (7 typów po 3 belki w serii):

- belka A - belka świadkowa ze starego drewna,
- belka B - belka wzmocniona, wklejoną jedną taśmą CFRP w układzie pionowym na całej długości belki; spękanie drewna symulowane na całej długości za pomocą asymetrycznych nacięć o szerokości 4 mm i głębokości 25 mm;

- belka C - belka z usuniętą skorodowaną częścią, zastąpioną nakładkami z drewna oraz wklejonymi na całej długości belki dwoma taśmami CFRP w układzie pionowym;
- belka D - belka wzmocniona wklejonymi dwoma taśmami CFRP w układzie pionowym na całej długości belki; nierównomierny przebieg włókien symulowany przez obustronne nacięcia o szerokości 3 mm i głębokości 20 mm;
- belka E - belka wzmocniona wklejonymi dwoma taśmami CFRP w układzie pionowym na całej długości belki; skręt włókien symulowany poprzez układ nierównoległych do krawędzi podłużnej belki 3 nacięć o szerokości 3 mm i głębokości 20 mm;
- belka F - belka wzmocniona w strefie maksymalnego momentu zginającego trzema taśmami CFRP, o długości od 400 do 600 mm, w układzie poziomym; osłabienie strefy rozciąganej symulowane wyciętym otworem o średnicy 25 mm;
- belka G - belka świadkowa z nowego drewna.

Przekroje poprzeczne badanych modeli oraz widok z boku pokazano na rys. 4.47, 4.56, 4.71, 4.86, 4.101, 4.115.

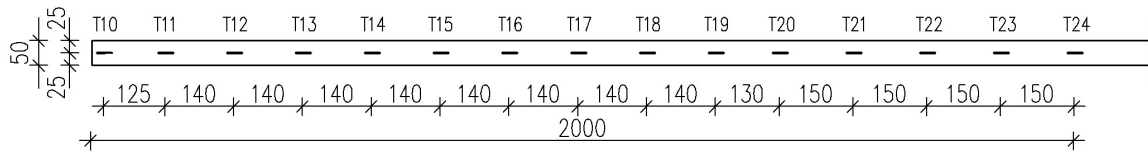
Specyfikację, użytych do wzmocniania belek, taśm podano w tab. 4.20, [95]. Do wklejania taśm użyto dwuskładnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej do mat kompozytowych S&P Resin 55 (ze względu na konsystencję umożliwiającą wklejenie wkładek wzmocniających do wnętrza przekroju). Uzupełnienia przekrojów nacięć w belkach B, C, D, E, po wklejeniu taśm, dokonano kompozycją kleju Resin 55 i mączki kwarcowej w stosunku wagowym 100:80.

Tab. 4.20. Dane techniczne zastosowanych taśm S&P Lamelle CFK 150/2000

rodzaj taśmy		S&P Lamelle CFK 150/2000
szerokość taśmy b_f	[mm]	50
grubość taśmy t_f	[mm]	1,2
moduł Younga E	[GPa]	> 165
wytrzymałość na rozciąganie $f_{w,t}$	[MPa]	> 2800
odkształcenie przy zerwaniu ϵ_w	[%]	> 1,5

Taśmy CFRP są fabrycznie przygotowane do klejenia z jednej strony. Jako, że taśmy miały zostać wklejone do wewnątrz druga strona została zmatowiona za pomocą drobnoziarnistego papieru ściernego. Taśmy przed wklejeniem zostały starannie oczyszczone i odtłuszczone przy użyciu acetonu technicznego. Wszystkie prace przy przygotowaniu ich do wklejenia w przekrój drewniany wykonywano w rękawiczkach by nie zatłuszczyć powierzchni taśmy, co mogłoby zmniejszyć przyczepność kleju, [243]. Nacięcia w belkach, w których umieszczano zbrojenie zostały oczyszczone sprężonym powietrzem, by usunąć wszystkie znajdujące się tam luźne elementy, zwierziny, mogące mieć negatywny wpływ na jakość połączenia klejowego.

Tensometry elektrooporowe na taśmie zostały naklejone na połowie długości jednej z wklejonych w belkę taśm (belki B, C, D, E) oraz na całej długości taśm w belce F. Rozmieszczenie tensometrów na taśmach pokazano na rys. 4.46. W belce F tensometry zostały naklejone na każdą z trzech wklejonych taśm co 50 mm. Tensometry na taśmach, zatopionych w kompozycji klejowej, zostały zabezpieczone woskiem pszczelim.

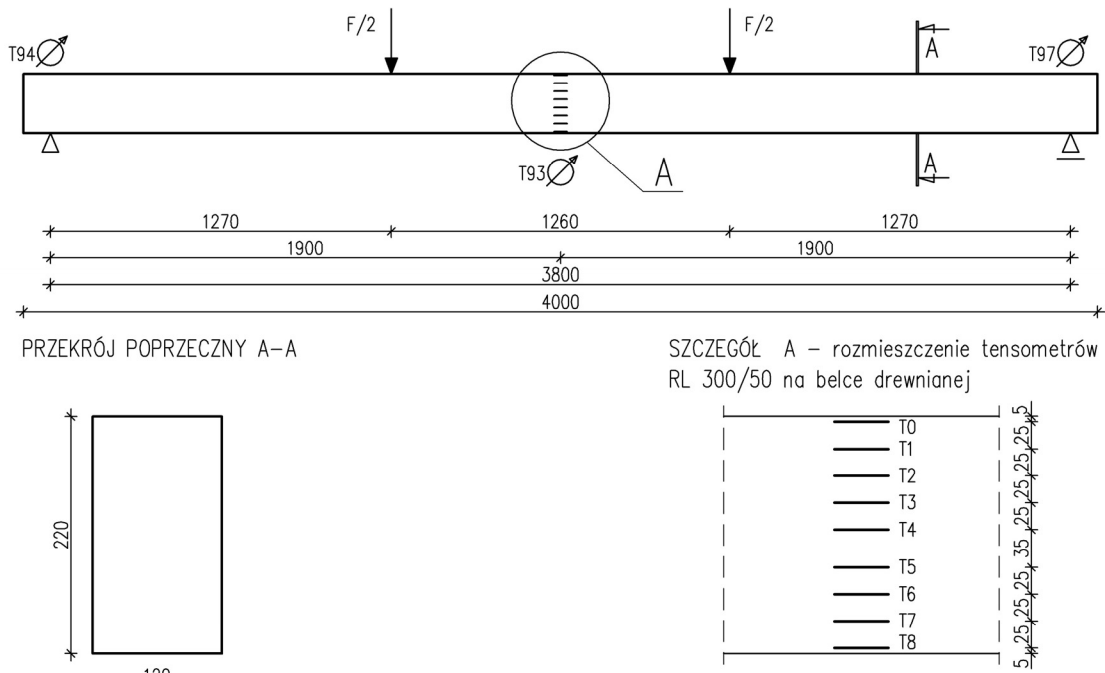


Rys. 4.46. Rozmieszczenie tensometrów na taśmie w belkach B, C, D, E
(tensometry naklejone na połowie jednej taśmy)

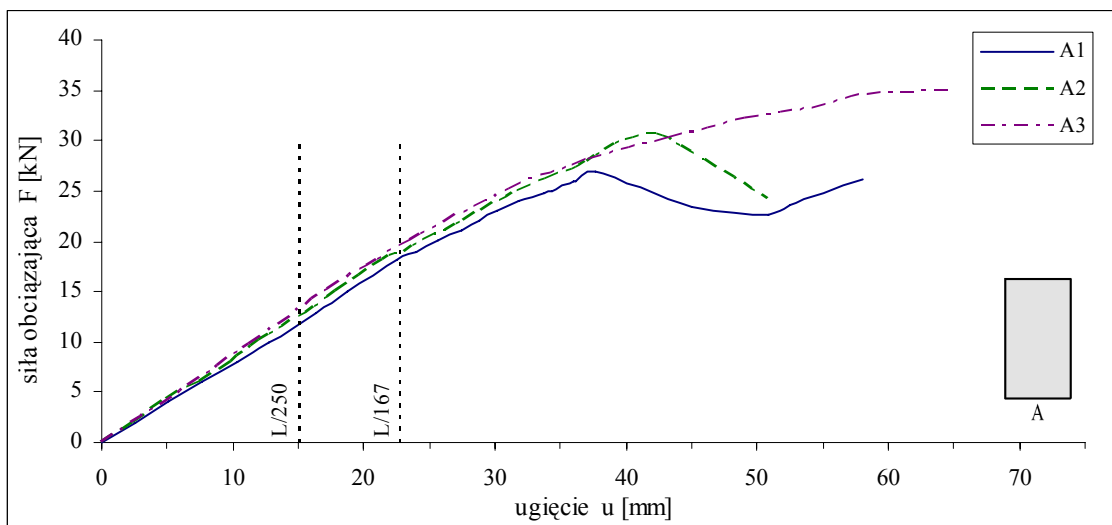
W rozdz. 4.3.2 - 4.3.8 przedstawiono ścieżki równowagi statycznej badanych belek. Dla modeli wzmocnionych pokazano, dla porównania, linię trendu dla trzech przebadanych belek świadkowych - A. Dodatkowo pokazano, liniami pionowymi, graniczne ugięcie $L/250$ dla stropów i $L/167$, czyli powiększone o 50% dla obiektów starych, remontowanych, wg [191].

Przedstawiono także rozkłady naprężeń normalnych w drewnie, w taśmach oraz naprężeń stycznych w spoinie wyznaczone na podstawie rozkładów odkształceń uzyskanych w badaniach.

4.3.2. Wyniki badań belek serii A



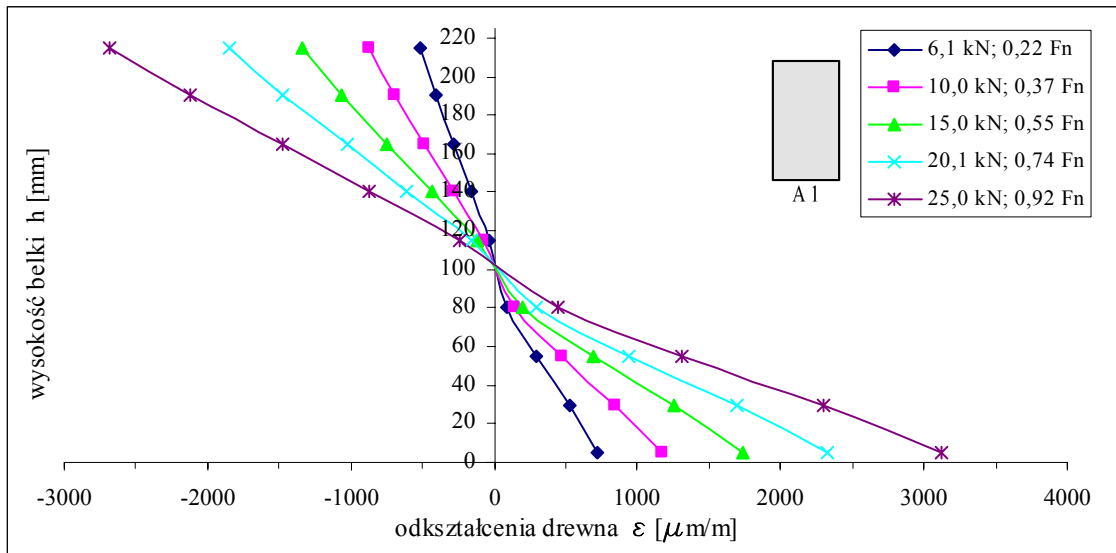
Rys. 4.47. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii A



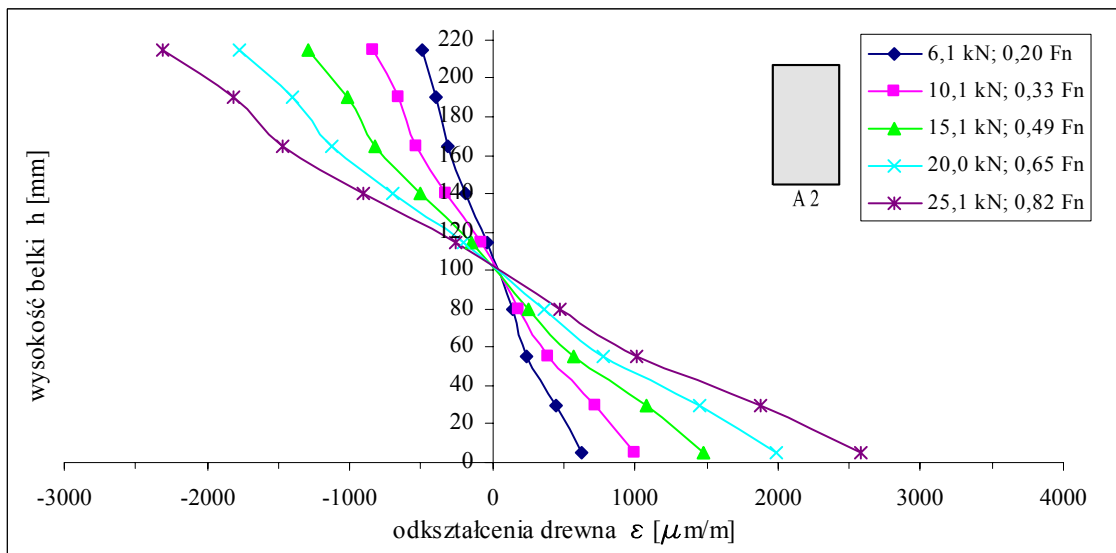
Rys. 4.48. Ścieżki równowagi belek serii A



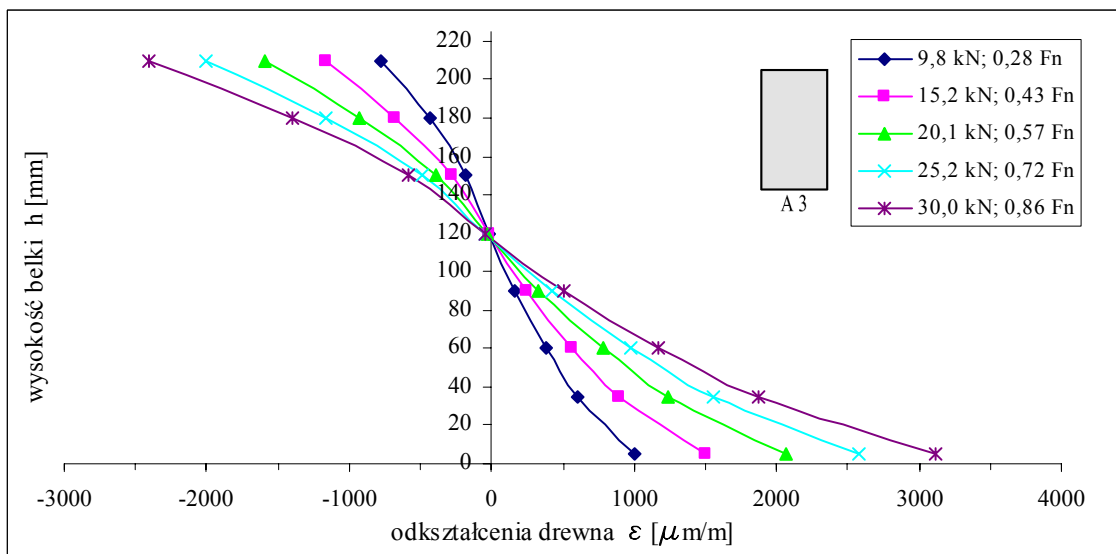
Rys. 4.49. Postać zniszczenia belki A1 (widoczna doklejona warstwa elastooptyczna)



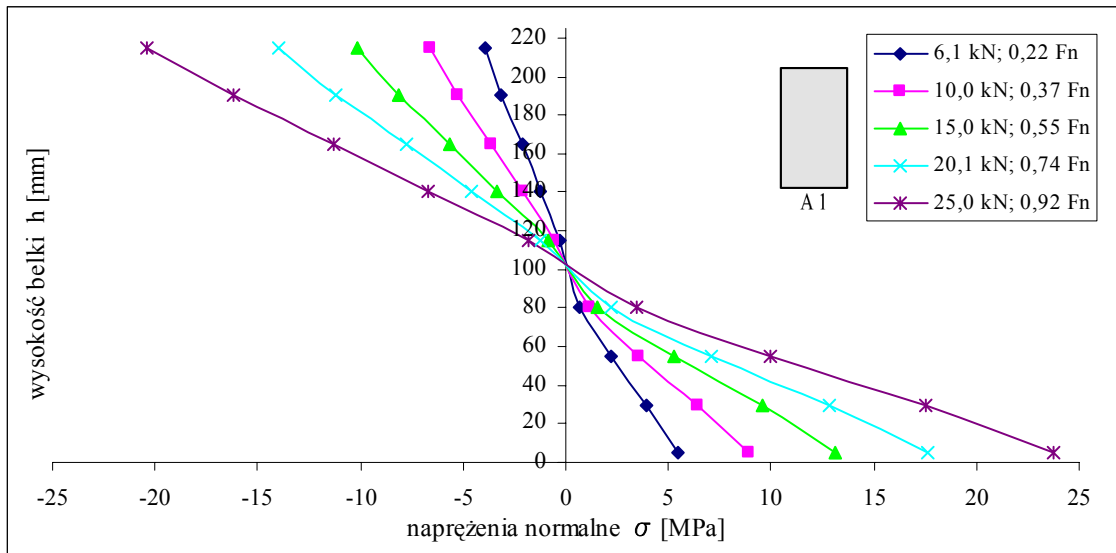
Rys. 4.50. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1



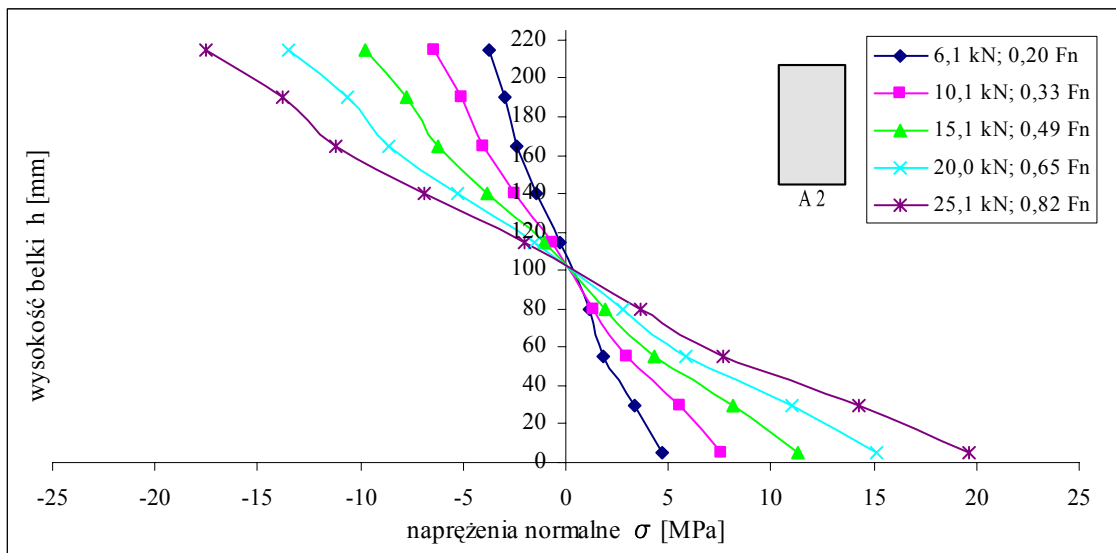
Rys. 4.51. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A2



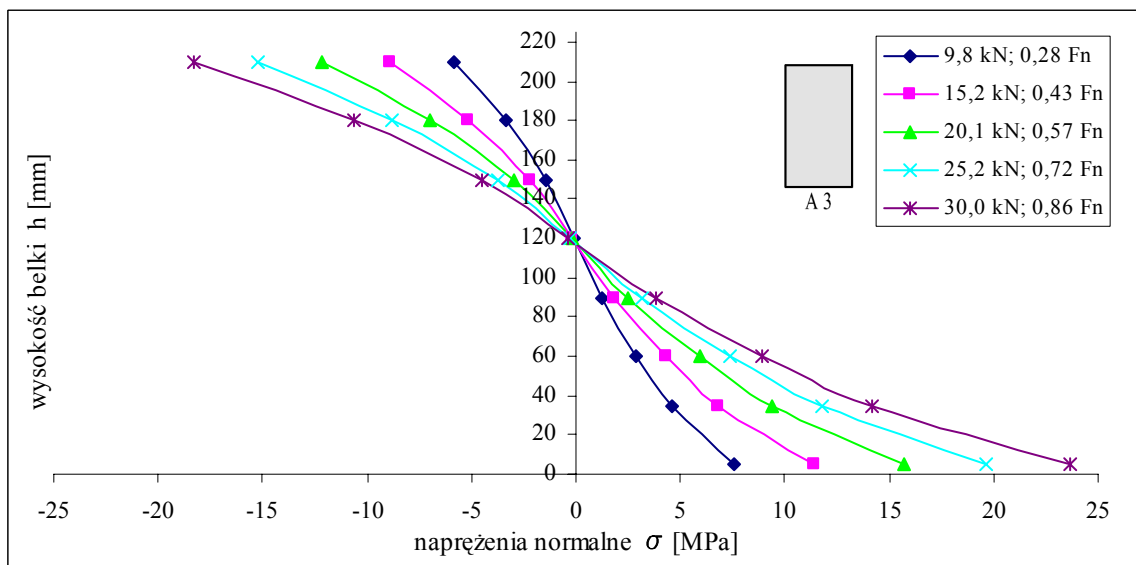
Rys. 4.52. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A3



Rys. 4.53. Naprężenia normalne w drewnie - belka A1

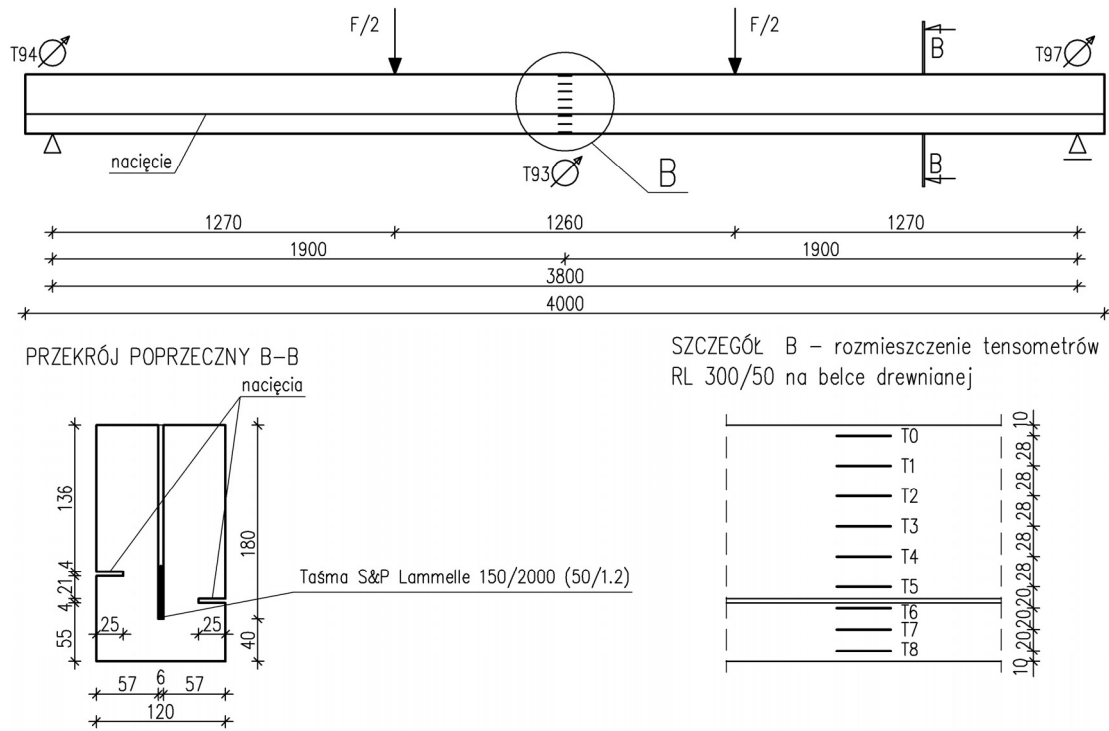


Rys. 4.54. Naprężenia normalne w drewnie - belka A2

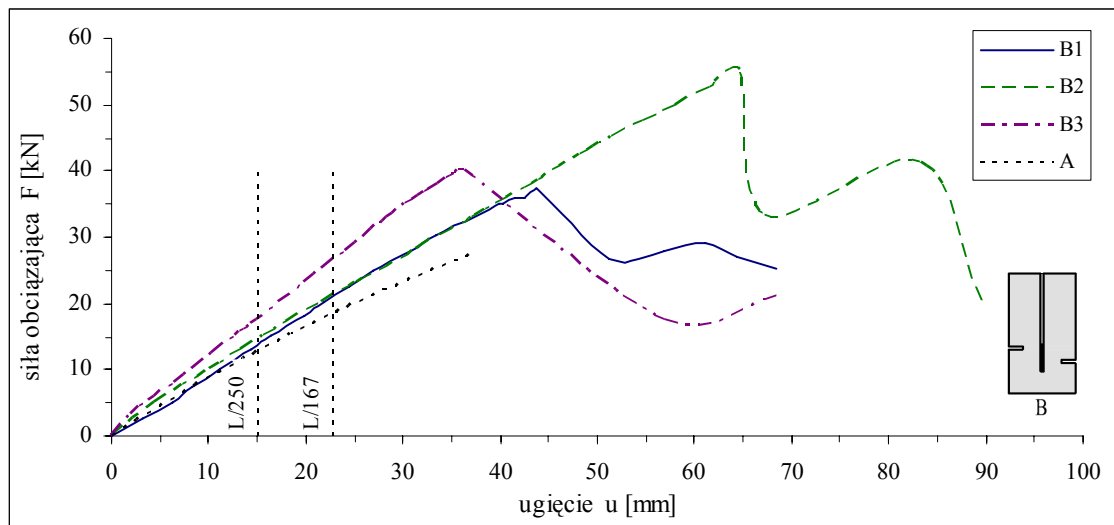


Rys. 4.55. Naprężenia normalne w drewnie - belka A3

4.3.3. Wyniki badań belek serii B



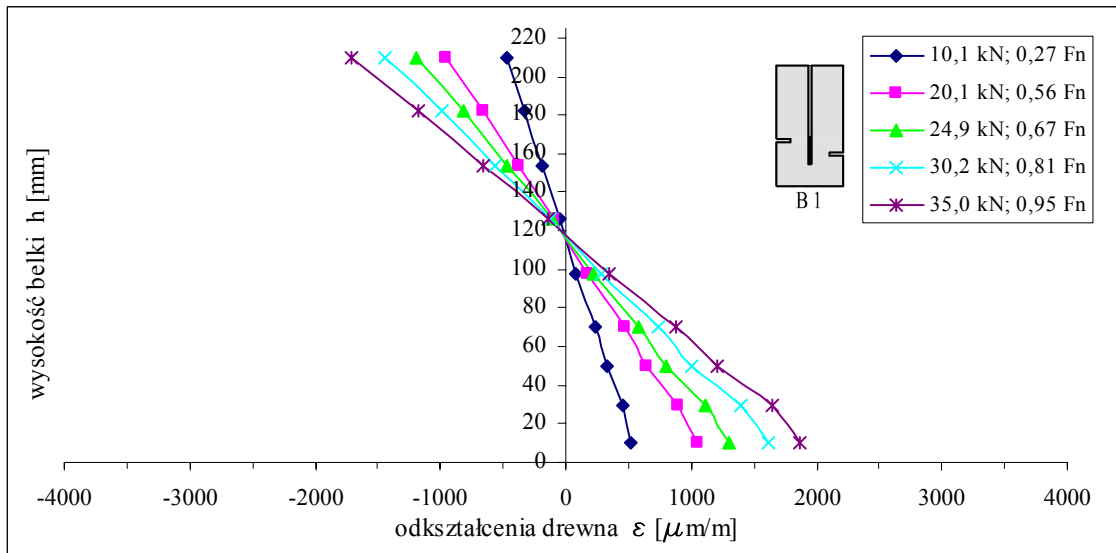
Rys. 4.56. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii B



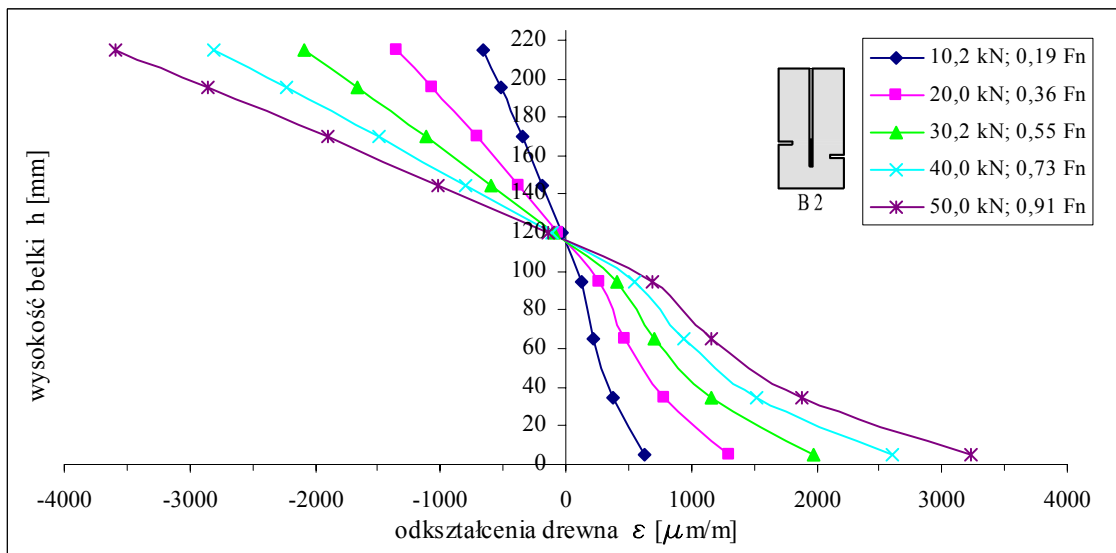
Rys. 4.57. Ścieżki równowagi belek serii B



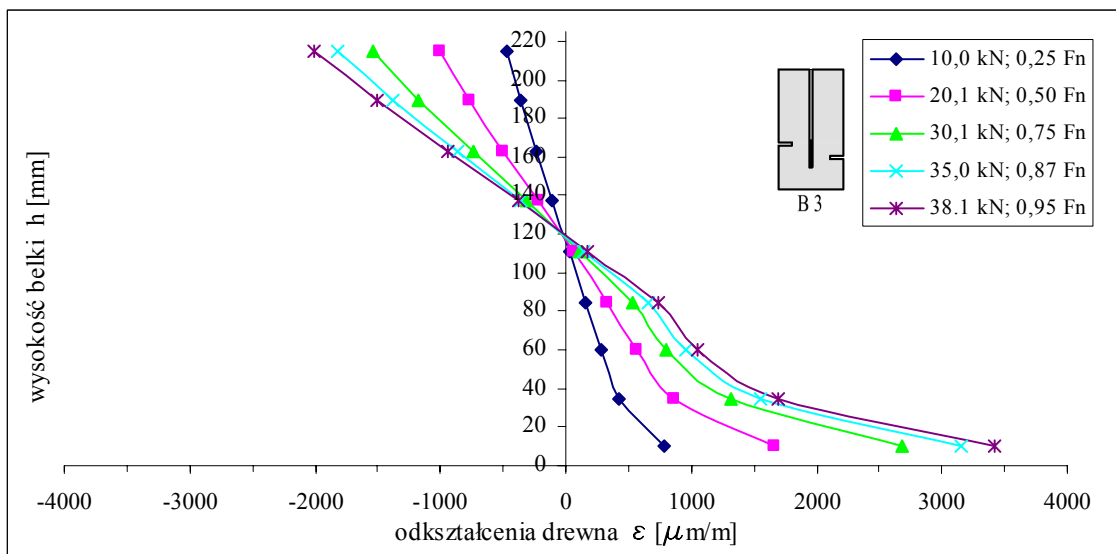
Rys. 4.58. Postać zniszczenia belki B2



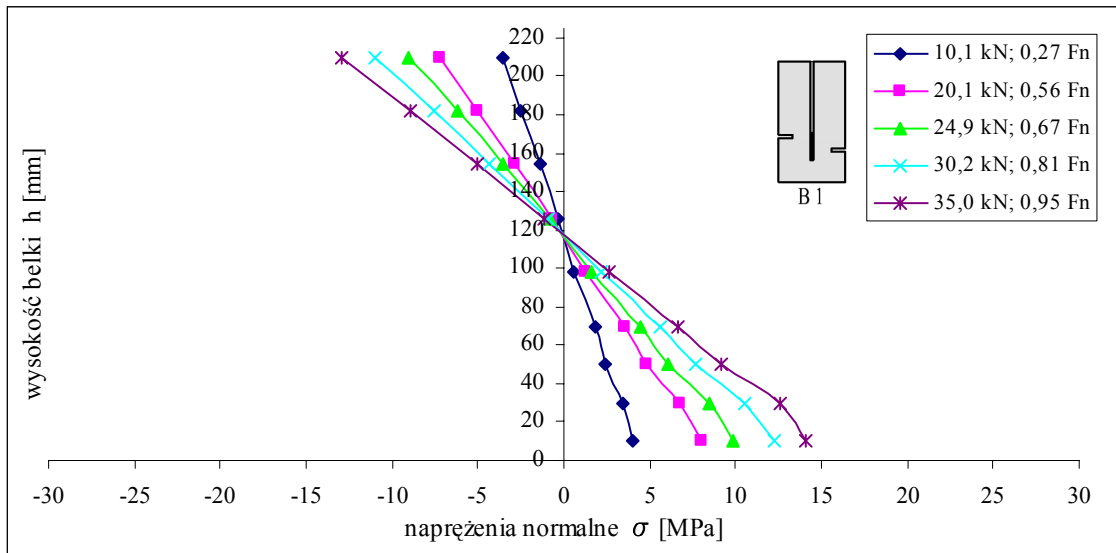
Rys. 4.59. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1



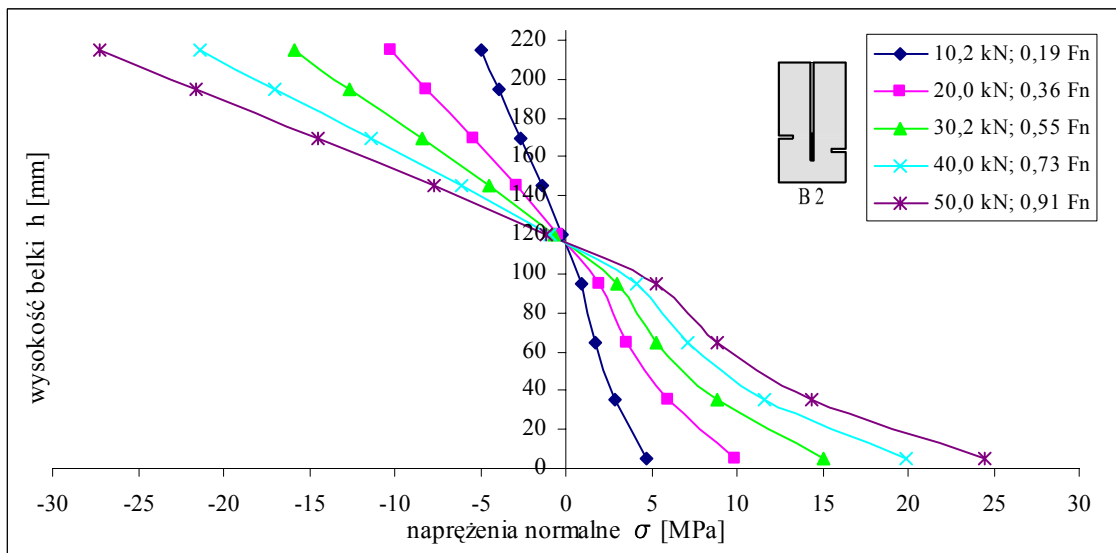
Rys. 4.60. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B2



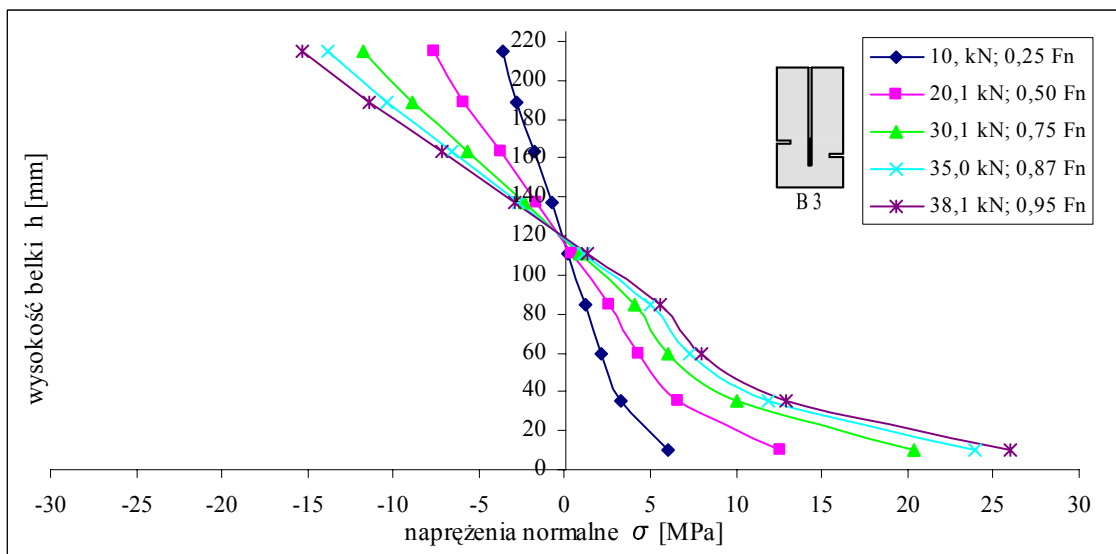
Rys. 4.61. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B3



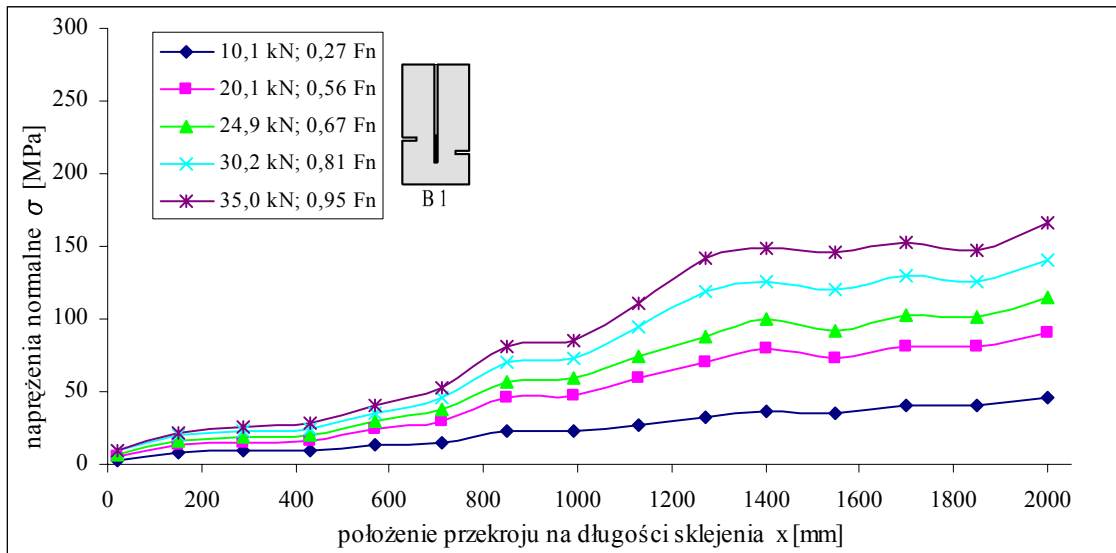
Rys. 4.62. Naprężenia normalne w drewnie - belka B1



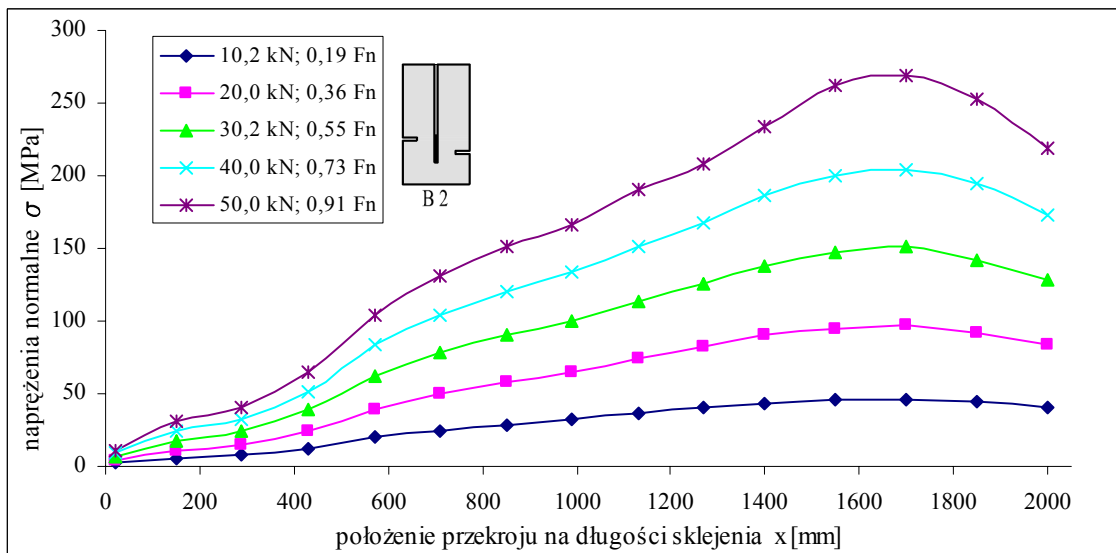
Rys. 4.63. Naprężenia normalne w drewnie - belka B2



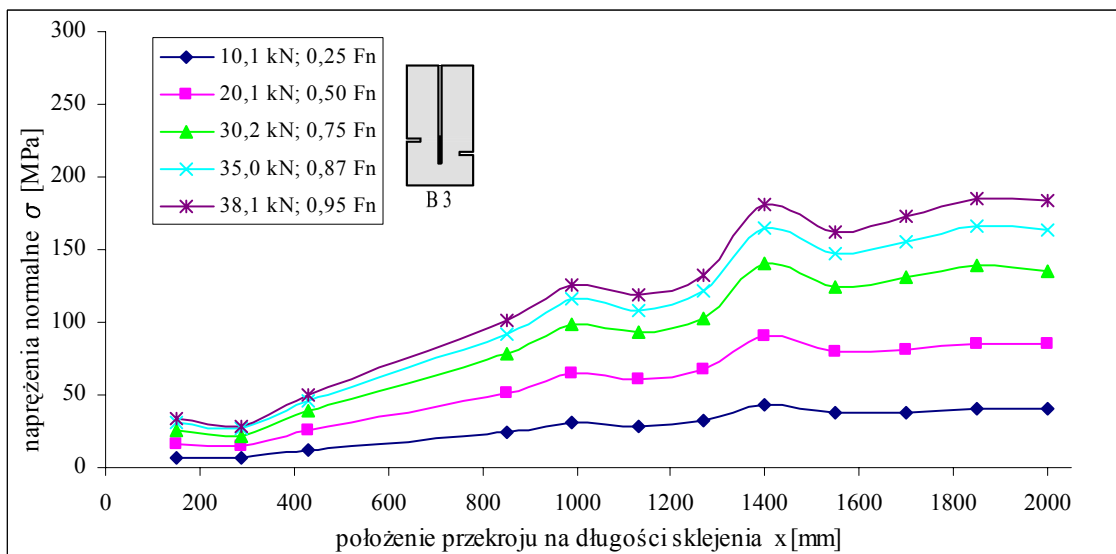
Rys. 4.64. Naprężenia normalne w drewnie - belka B3



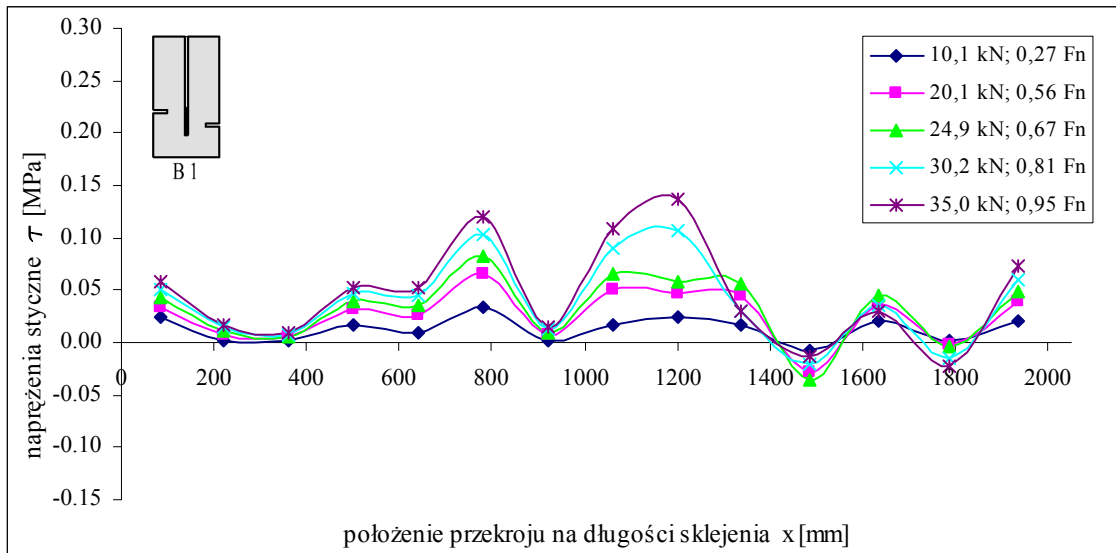
Rys. 4.65. Naprężenia normalne taśmie - belka B1



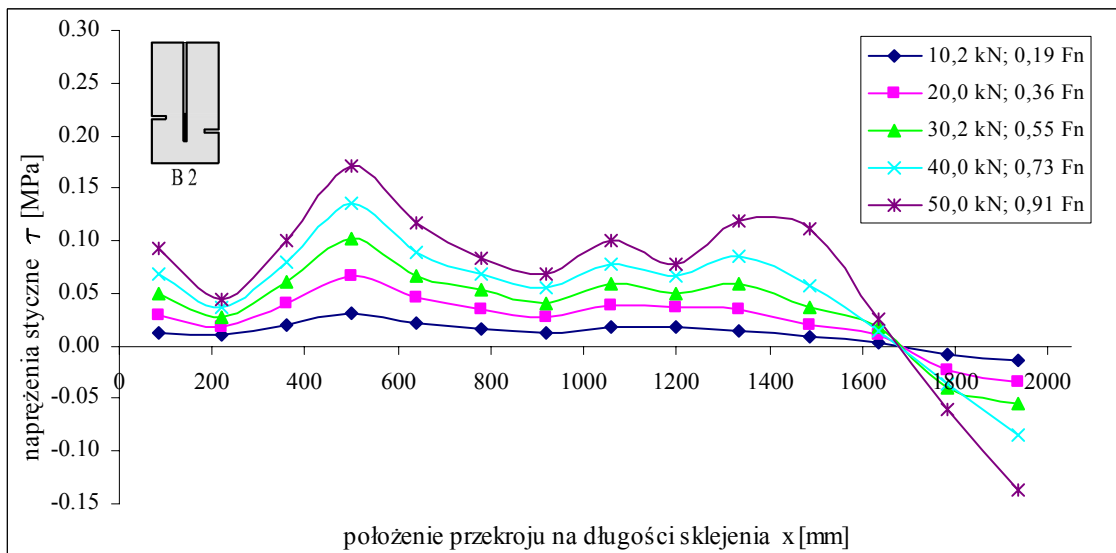
Rys. 4.66. Naprężenia normalne taśmie - belka B2



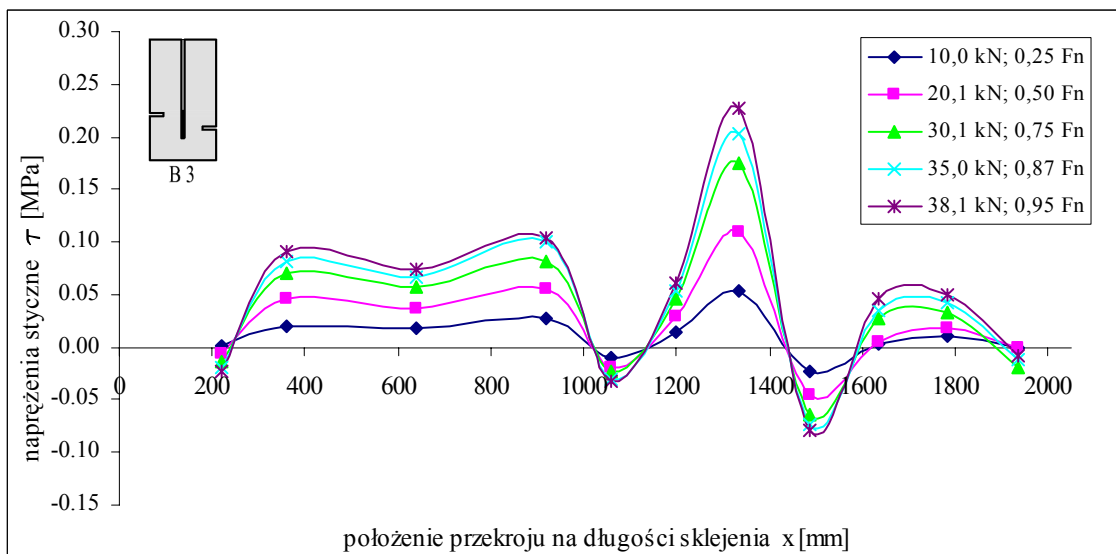
Rys. 4.67. Naprężenia normalne taśmie - belka B3



Rys. 4.68. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce B1

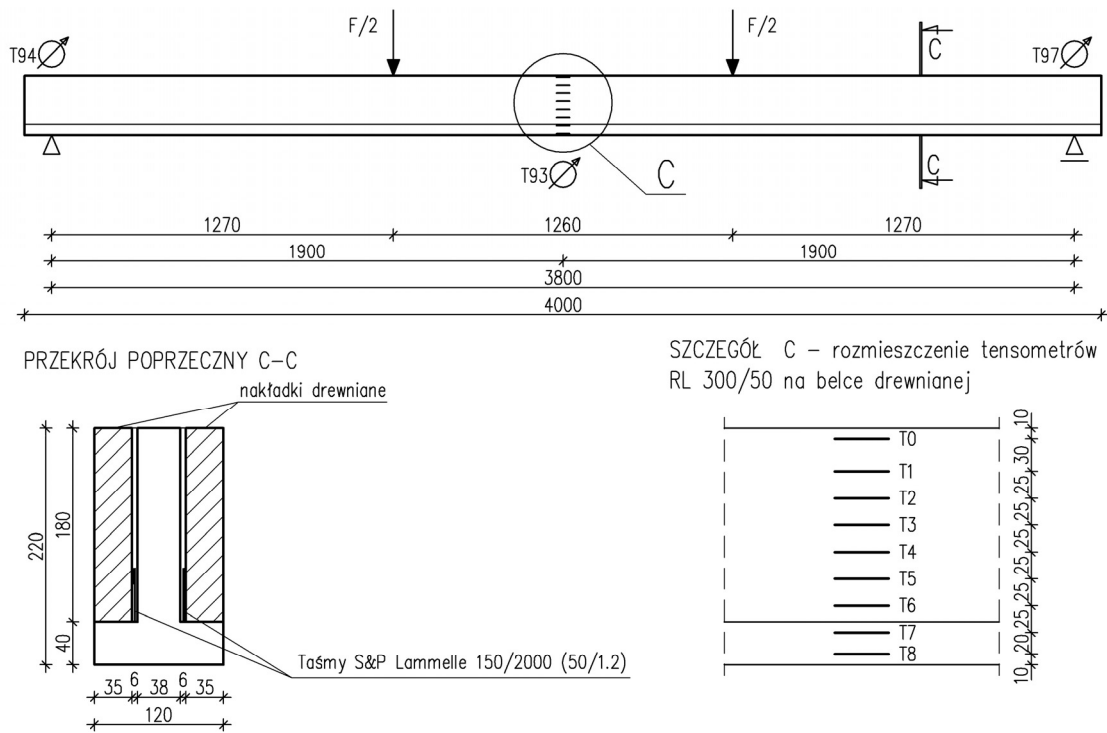


Rys. 4.69. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce B2

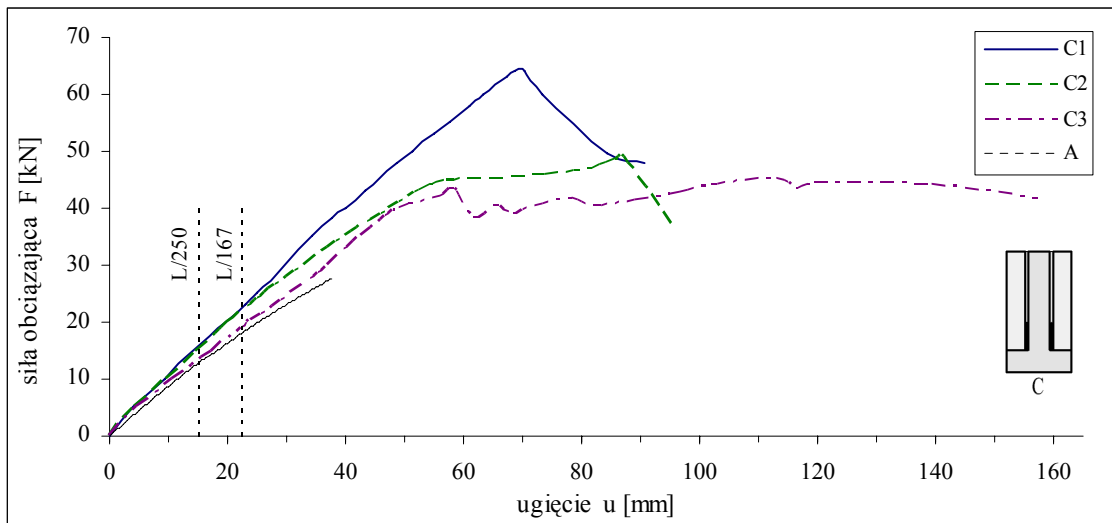


Rys. 4.70. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce B3

4.3.4. Wyniki badań belek serii C



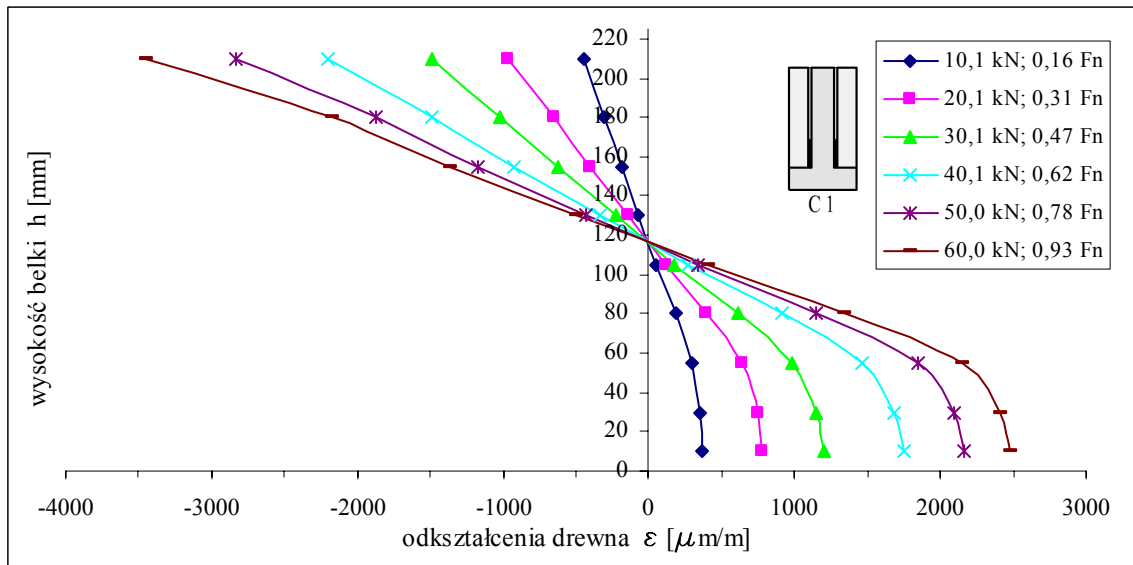
Rys. 4.71. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii C



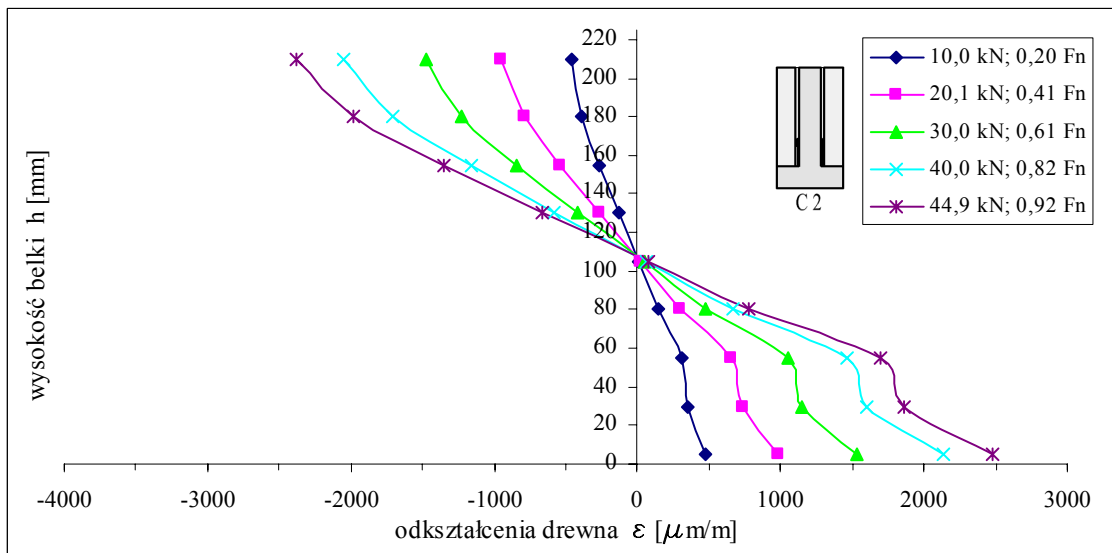
Rys. 4.72. Ścieżki równowagi belek serii C



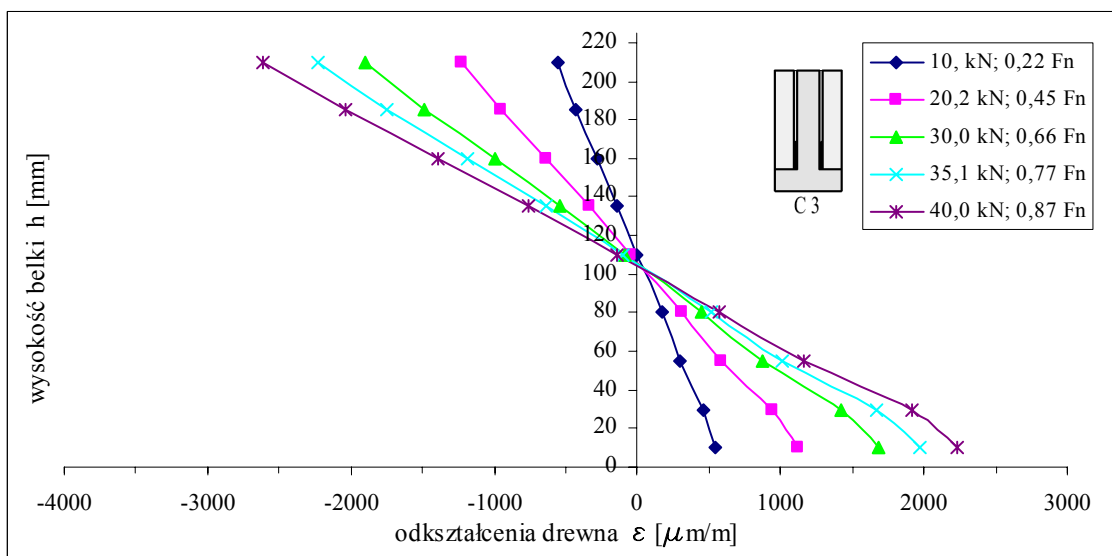
Rys. 4.73. Postać zniszczenia belki C3



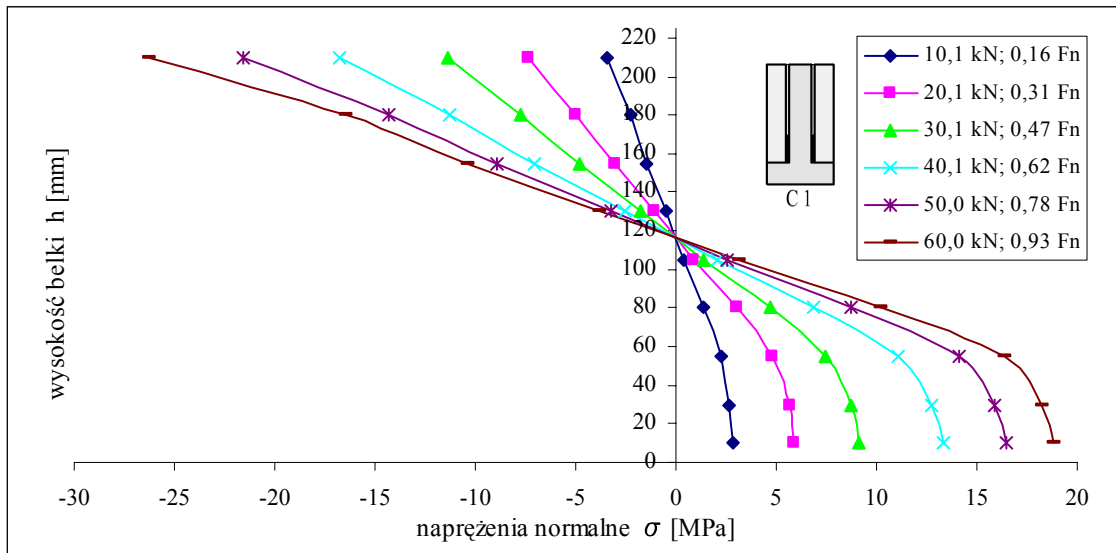
Rys. 4.74. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka C1



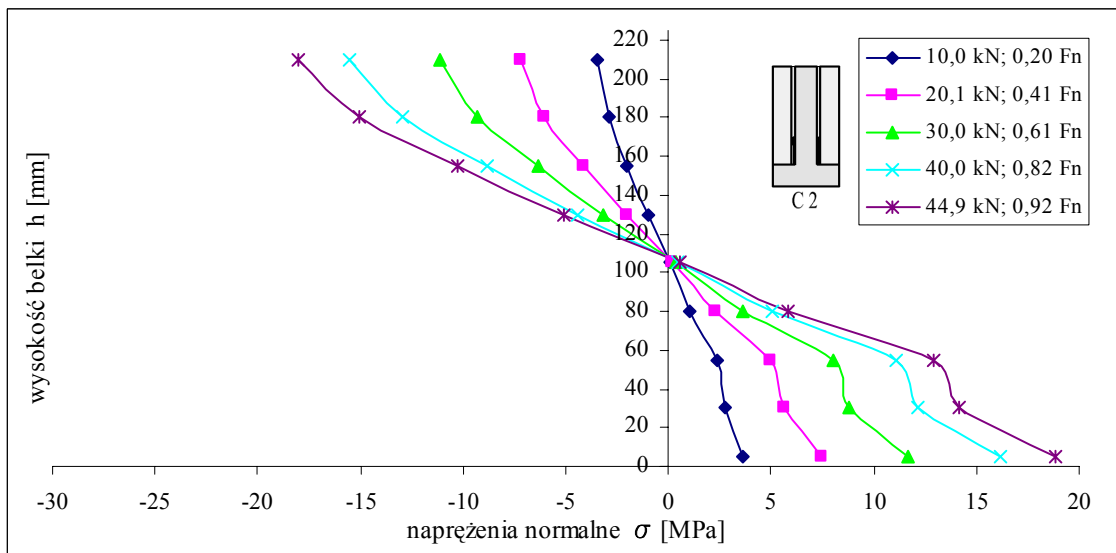
Rys. 4.75. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka C2



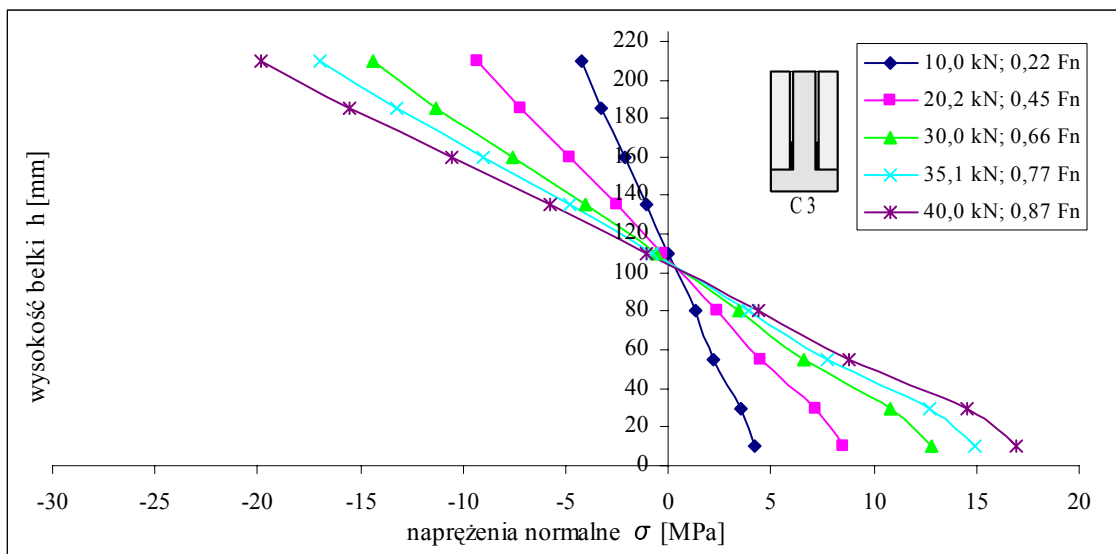
Rys. 4.76. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka C3



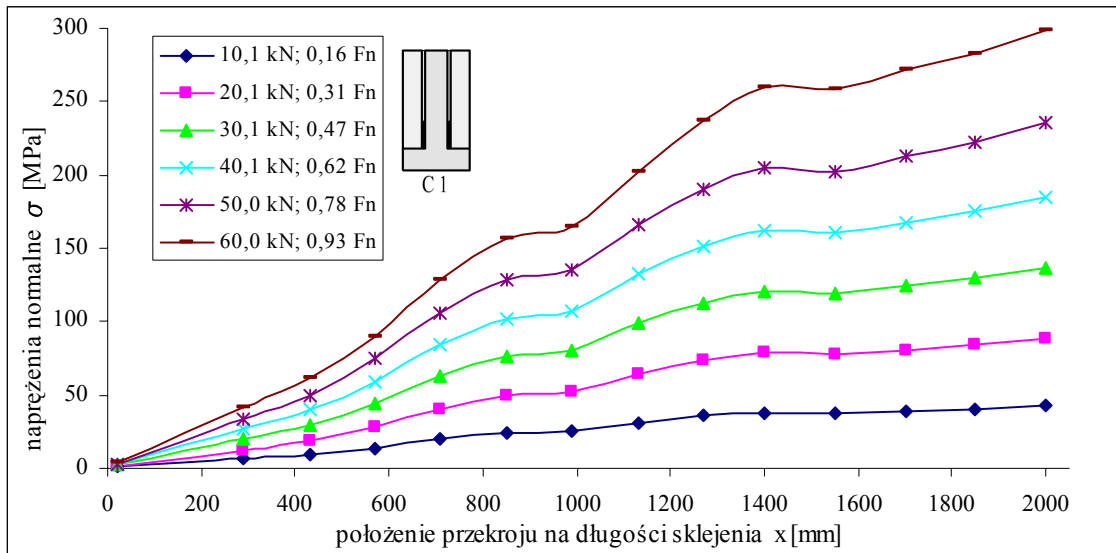
Rys. 4.77. Naprężenia normalne w drewnie - belka C1



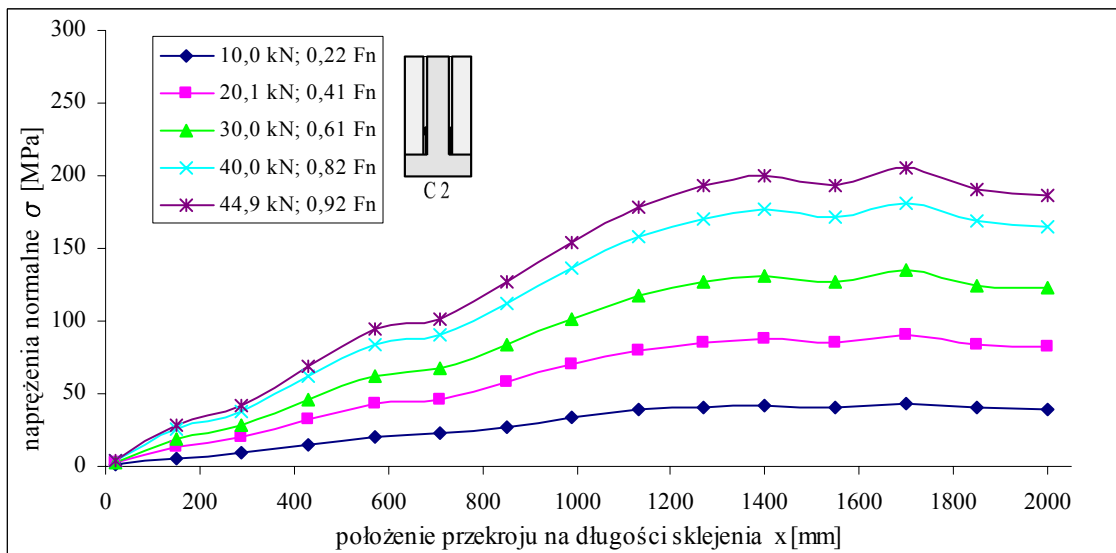
Rys. 4.78. Naprężenia normalne w drewnie - belka C2



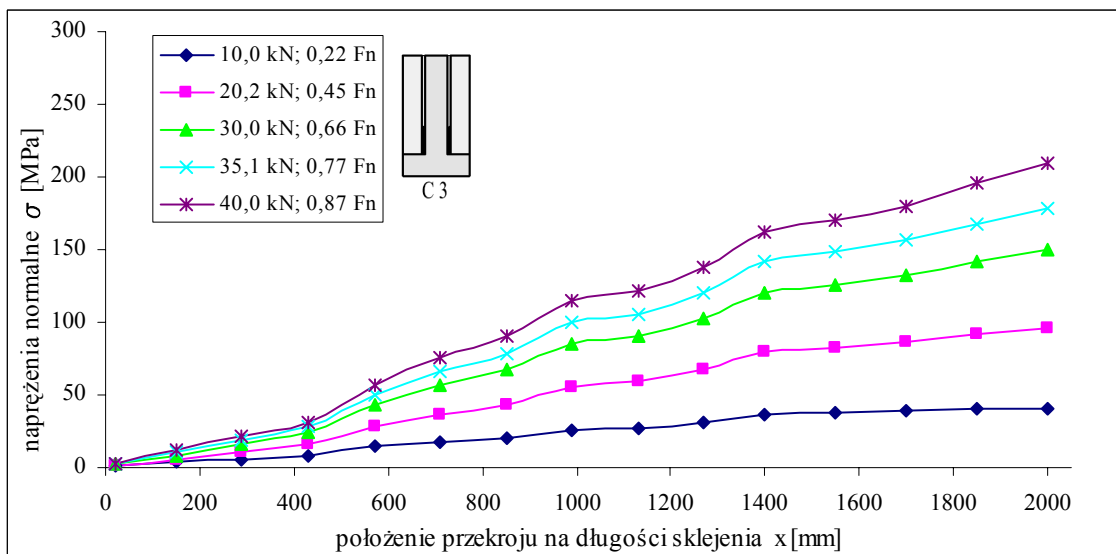
Rys. 4.79. Naprężenia normalne w drewnie - belka C3



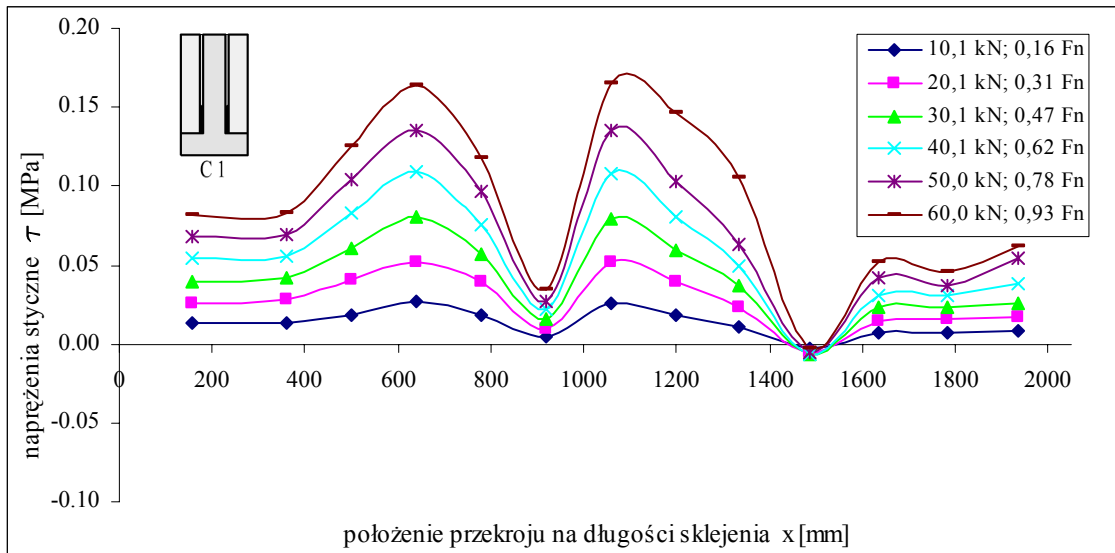
Rys. 4.80. Naprężenia normalne taśmie - belka C1



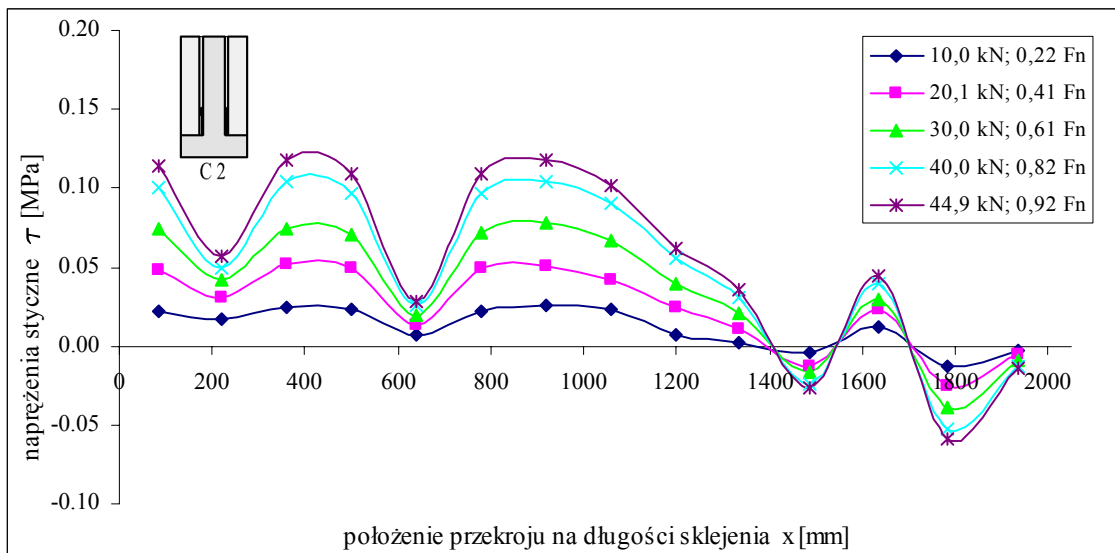
Rys. 4.81. Naprężenia normalne taśmie - belka C2



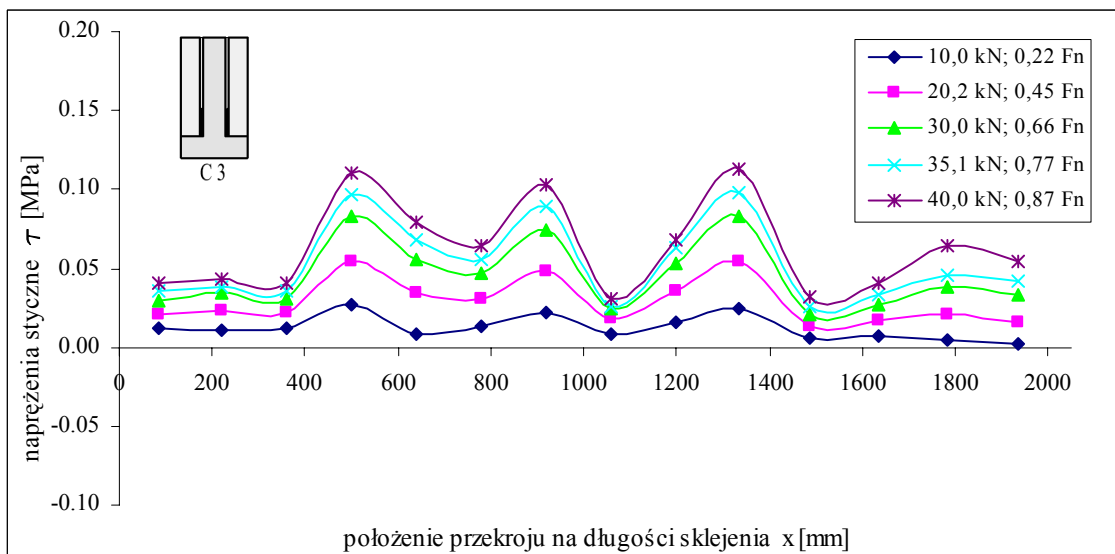
Rys. 4.82. Naprężenia normalne taśmie - belka C3



Rys. 4.83. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce C1

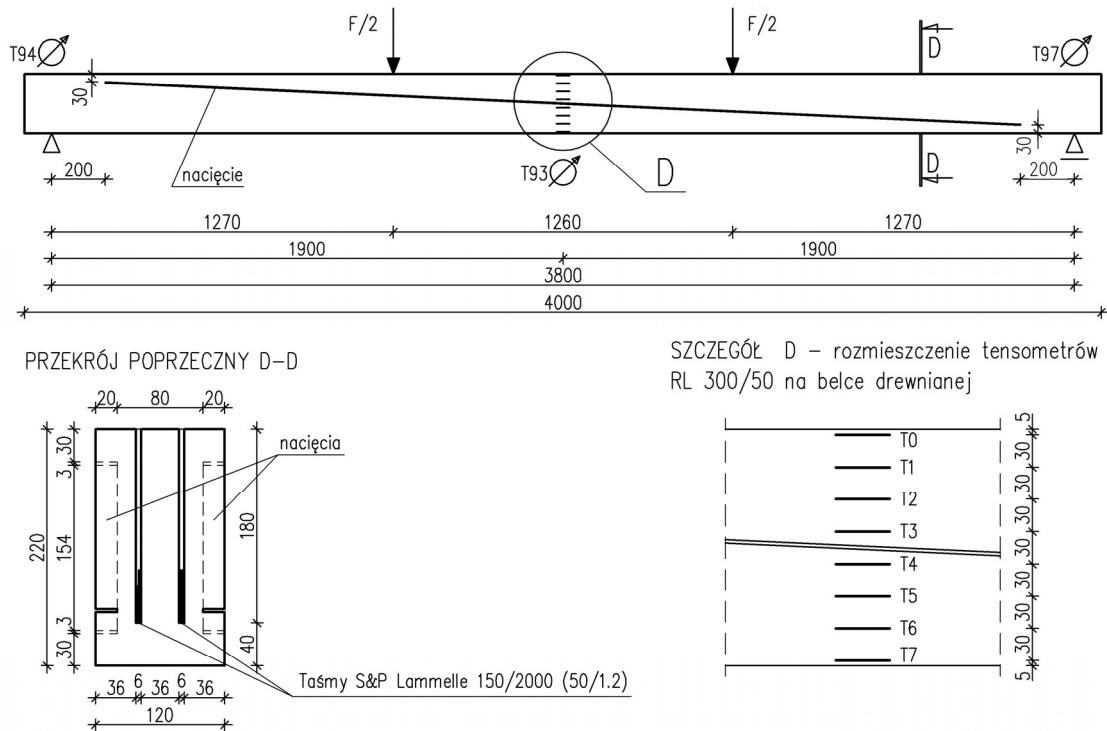


Rys. 4.84. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce C2

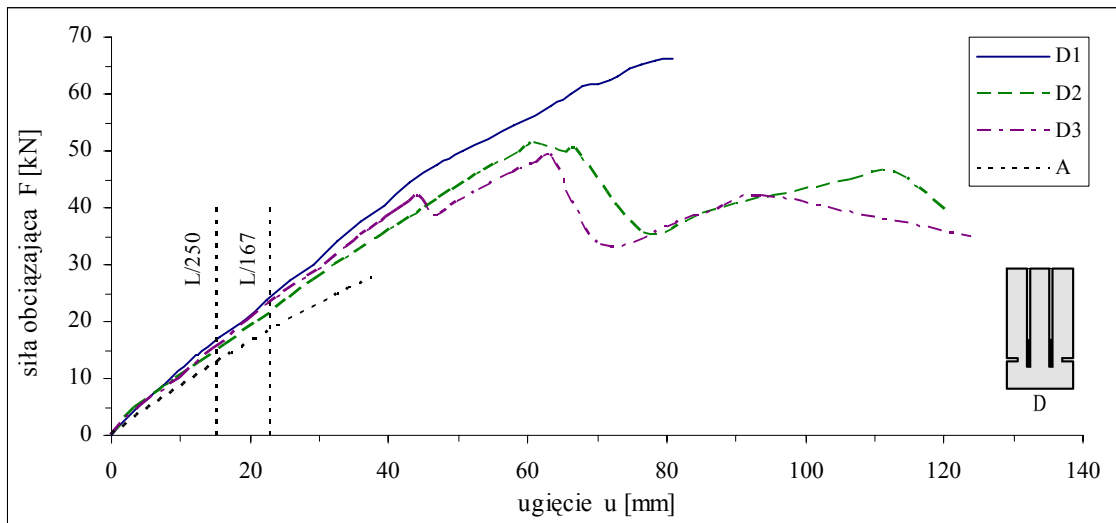


Rys. 4.85. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce C3

4.3.5. Wyniki badań belek serii D



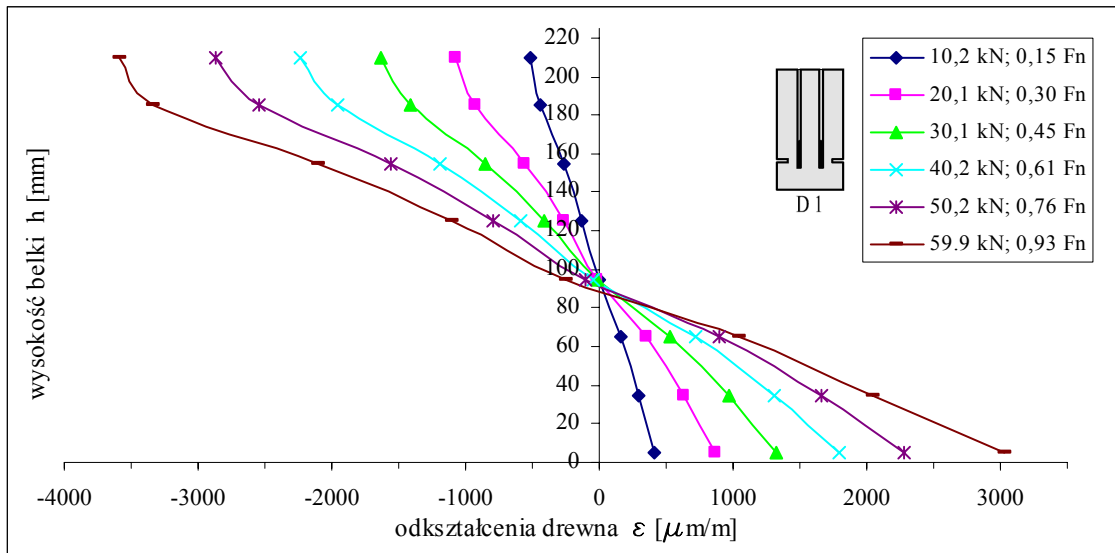
Rys. 4.86. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii D



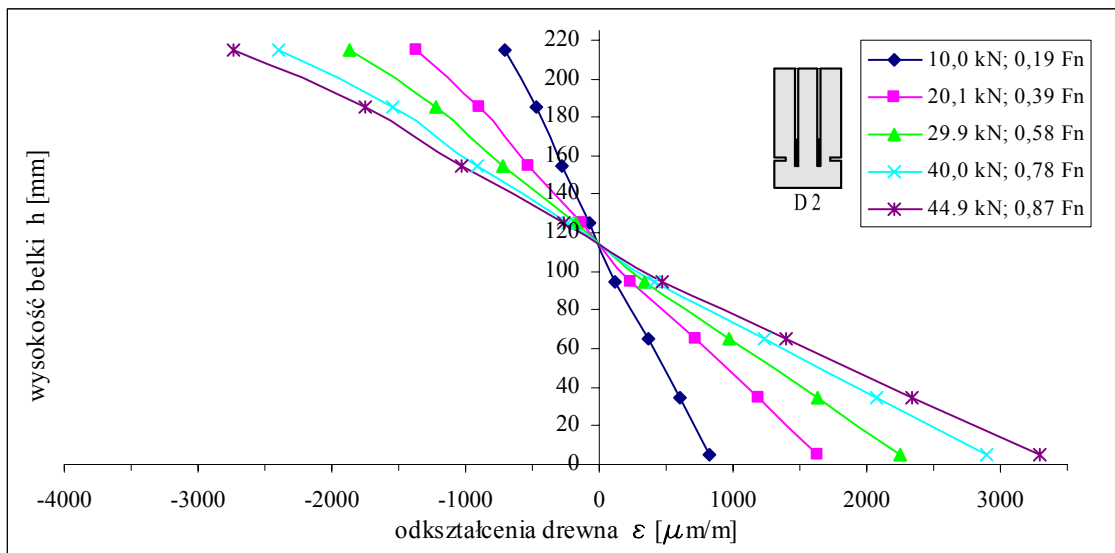
Rys. 4.87. Ścieżki równowagi belek serii D



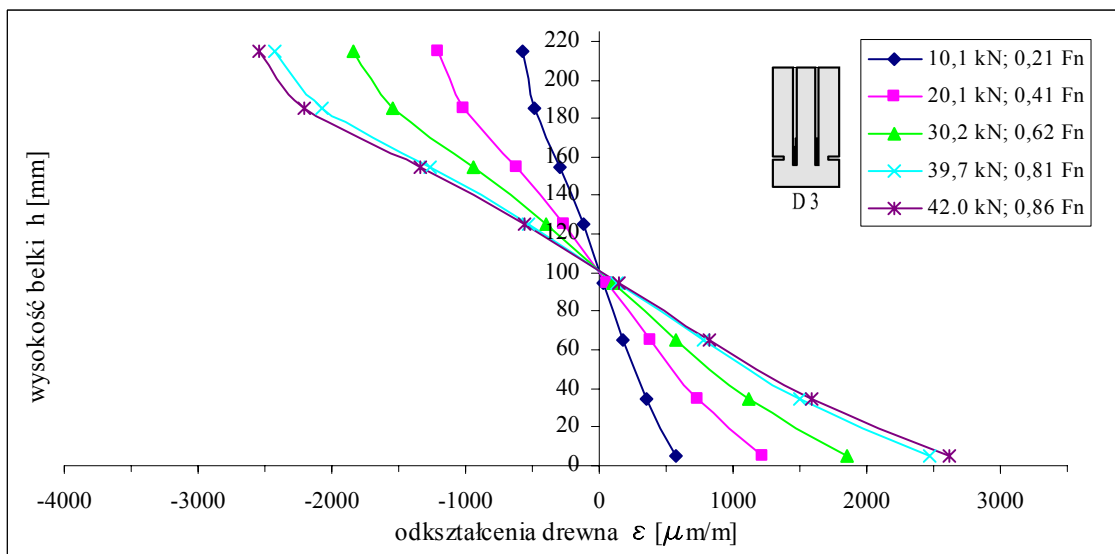
Rys. 4.88. Postać zniszczenia belki D1 (widoczna doklejona warstwa elastooptyczna)



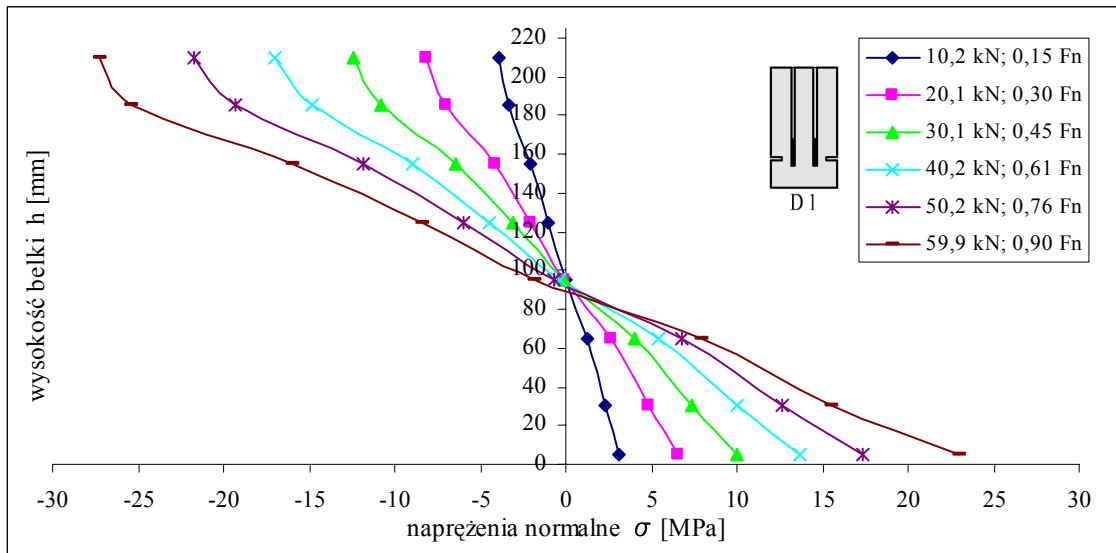
Rys. 4.89. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D1



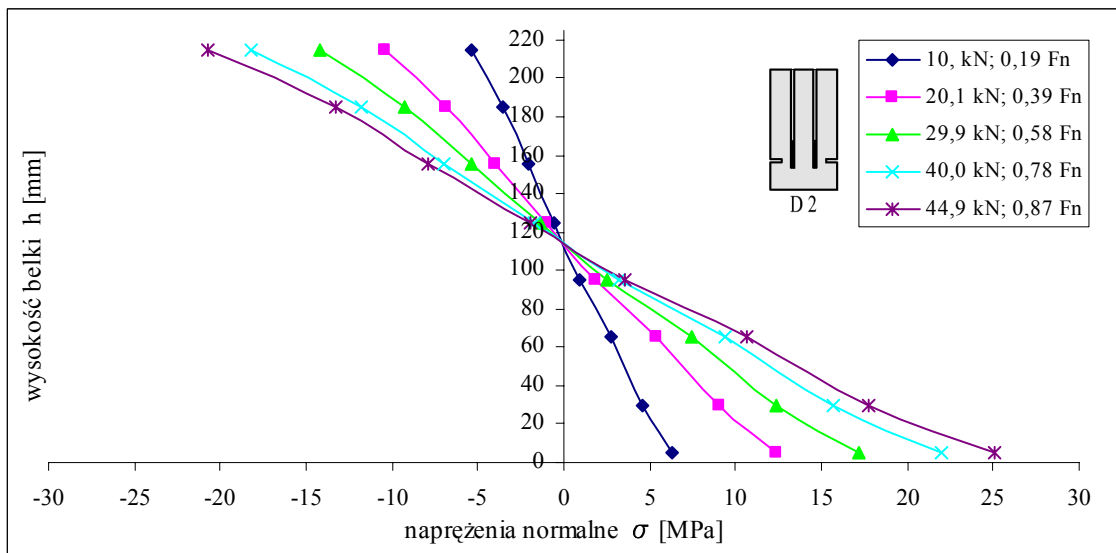
Rys. 4.90. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D2



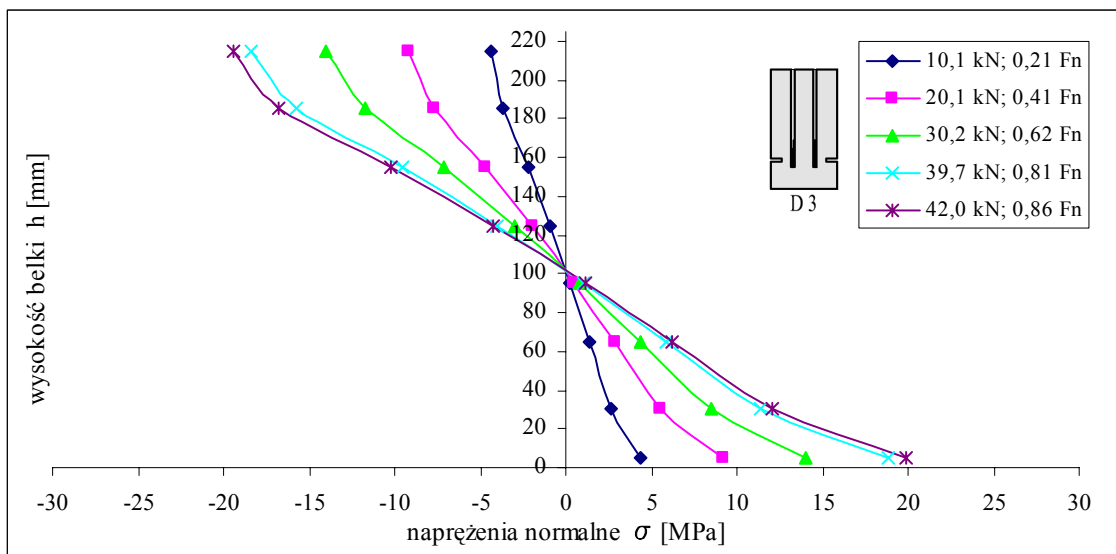
Rys. 4.91. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D3



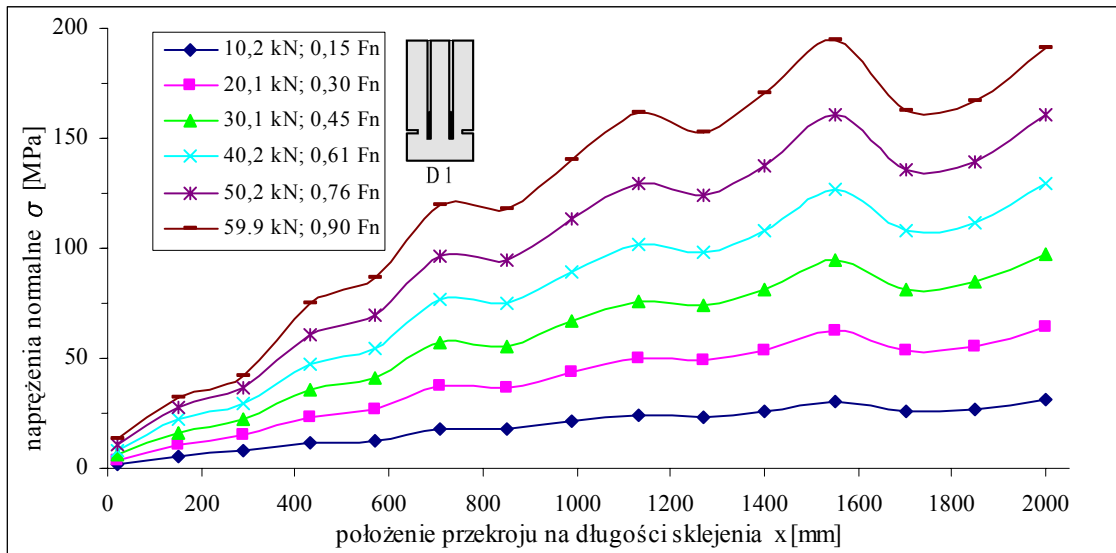
Rys. 4.92. Naprężenia normalne w drewnie - belka D1



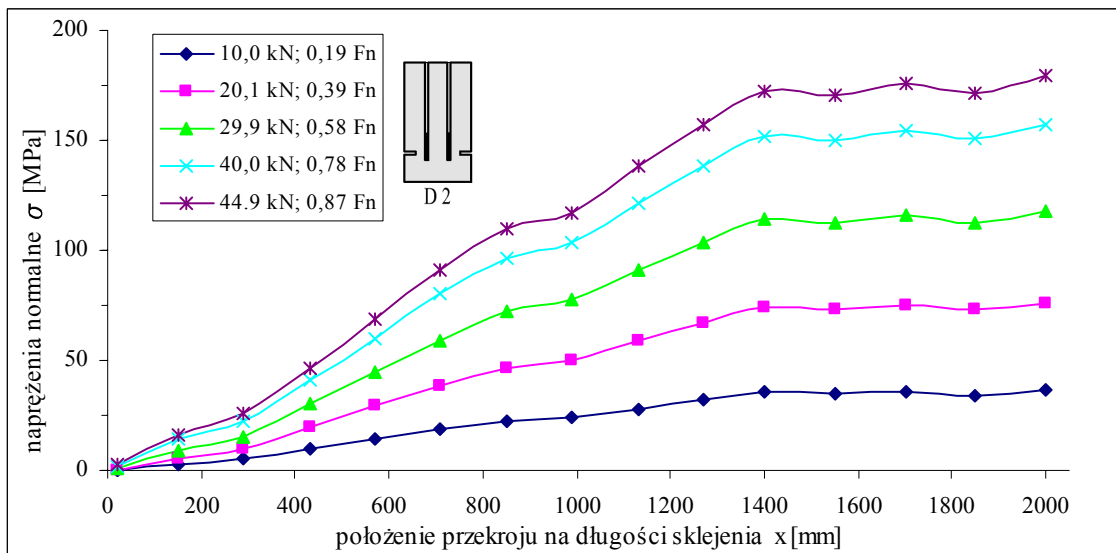
Rys. 4.93. Naprężenia normalne w drewnie - belka D2



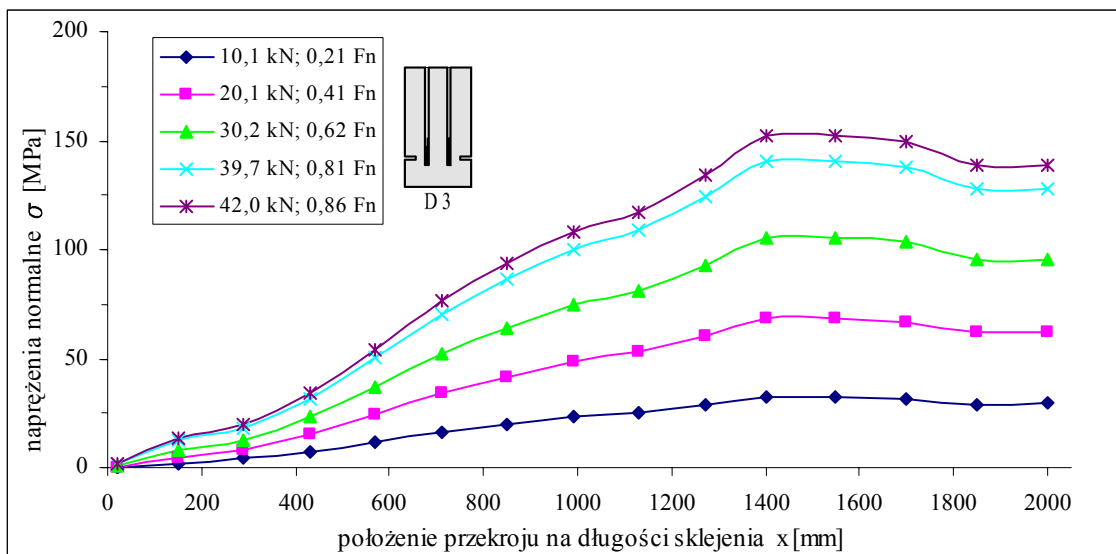
Rys. 4.94. Naprężenia normalne w drewnie - belka D3



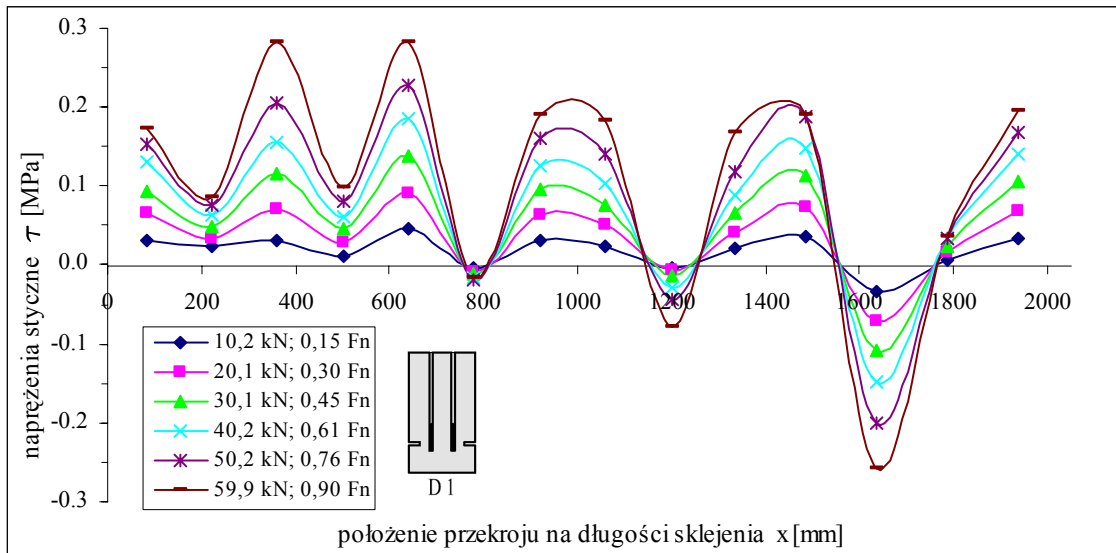
Rys. 4.95. Naprężenia normalne taśmie - belka D1



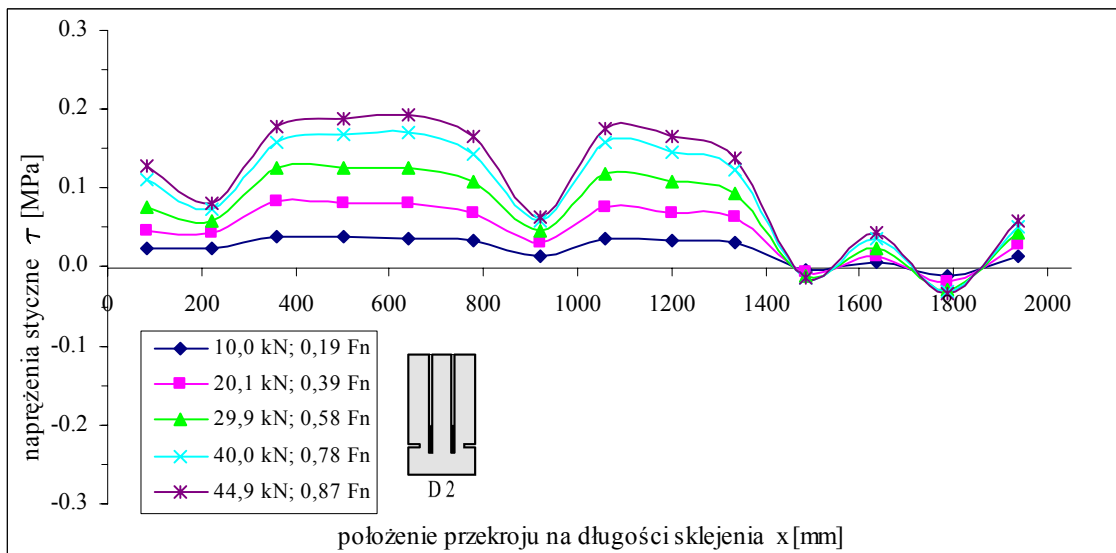
Rys. 4.96. Naprężenia normalne taśmie - belka D2



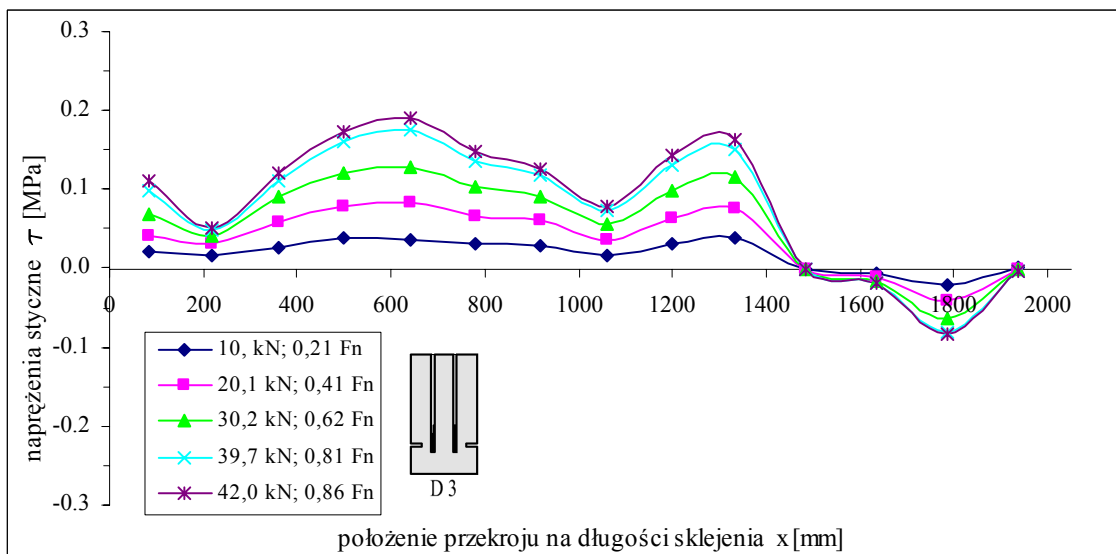
Rys. 4.97. Naprężenia normalne taśmie - belka D3



Rys. 4.98. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce D1

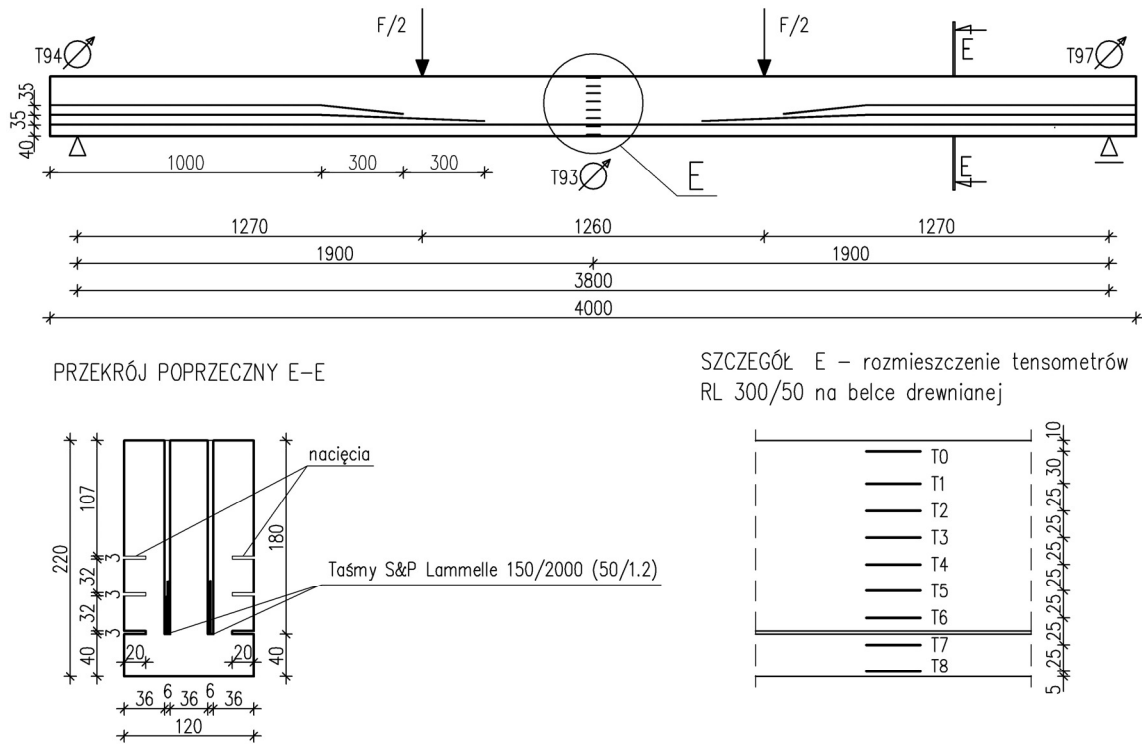


Rys. 4.99. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce D2

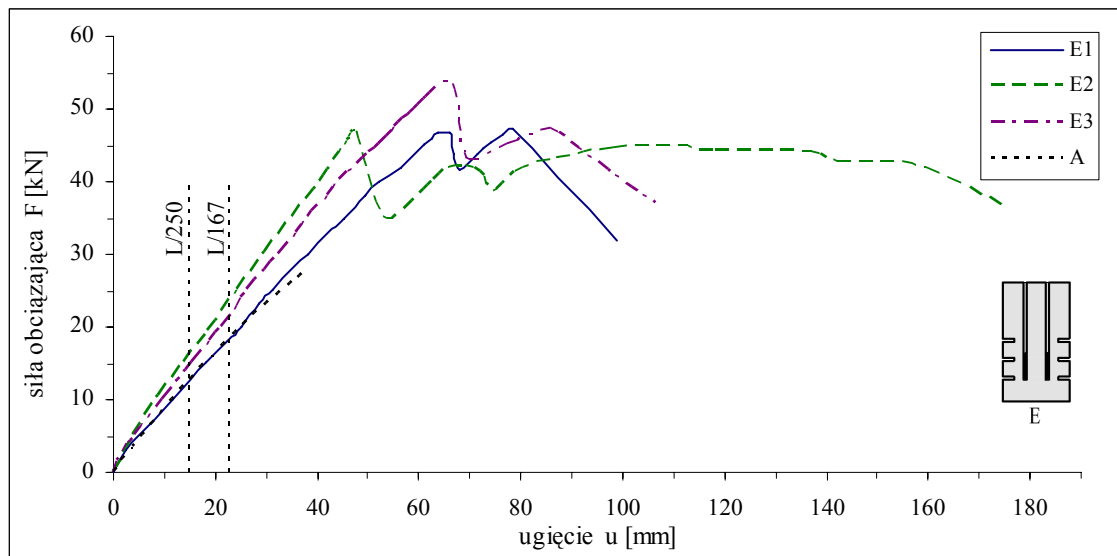


Rys. 4.100. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce D3

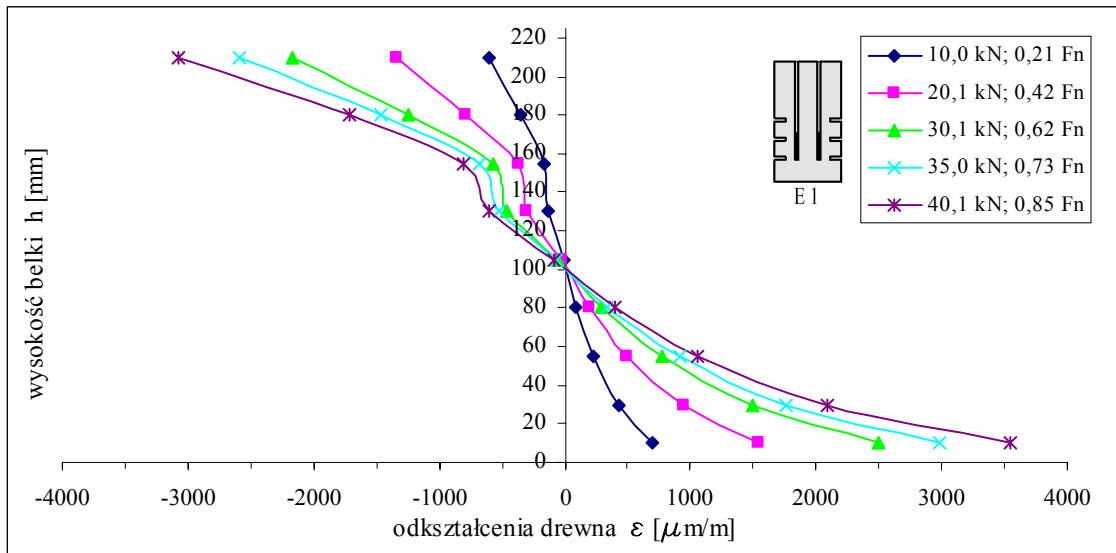
4.3.6. Wyniki badań belek serii E



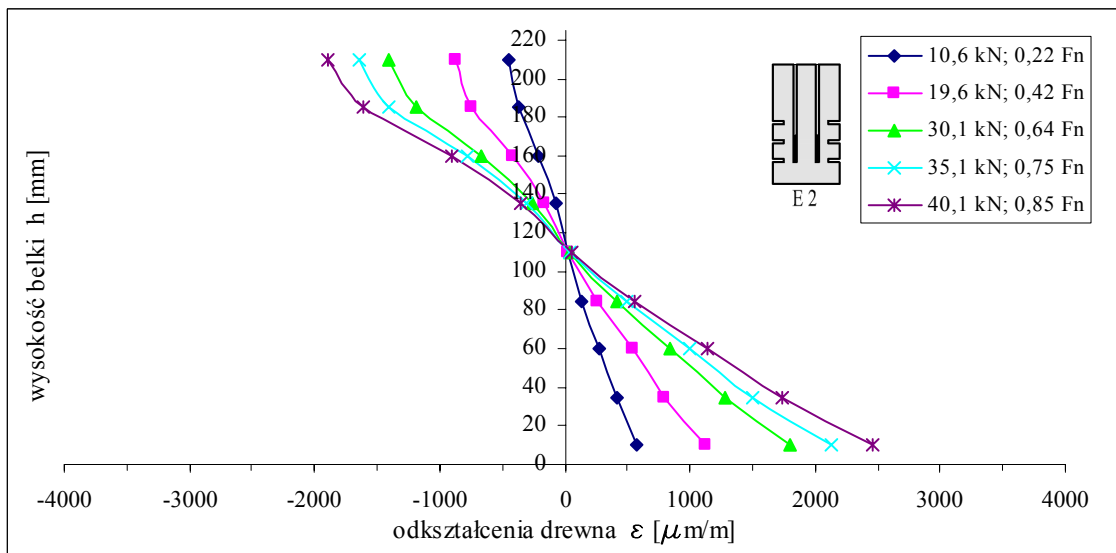
Rys. 4.101. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii E



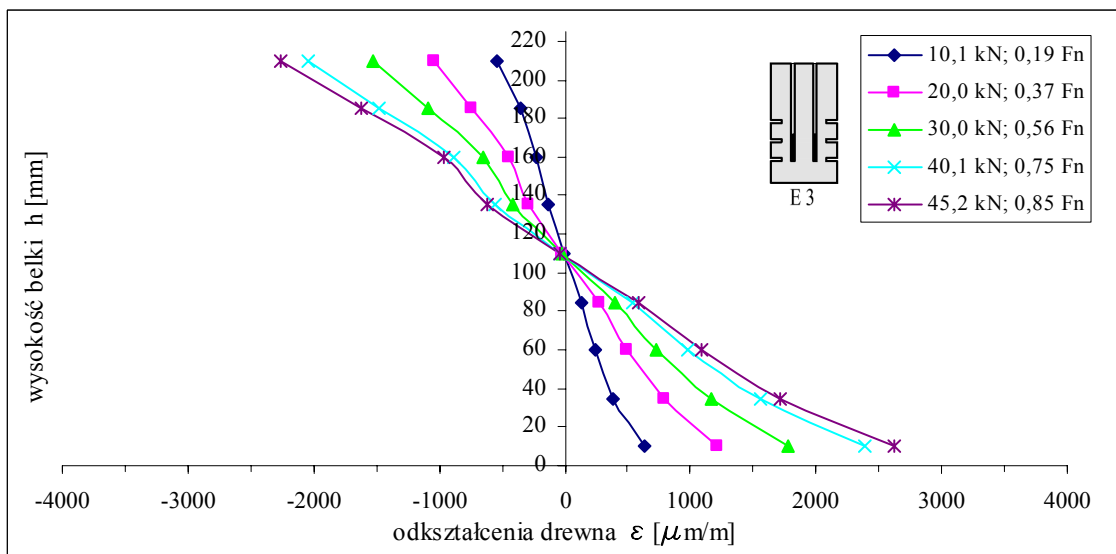
Rys.4.102. Ścieżki równowagi belek serii E



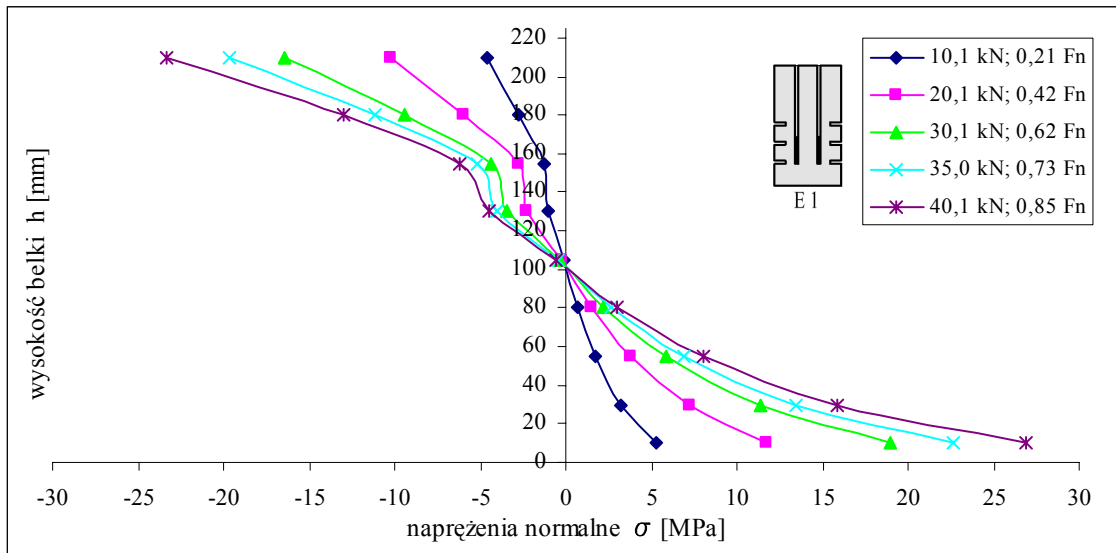
Rys. 4.103. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka E1



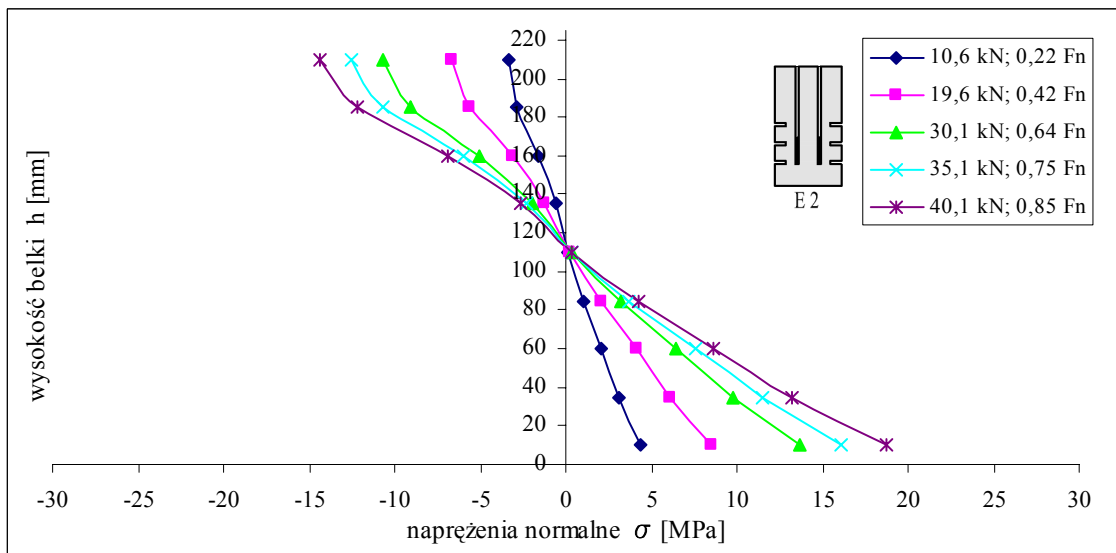
Rys. 4.104. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka E2



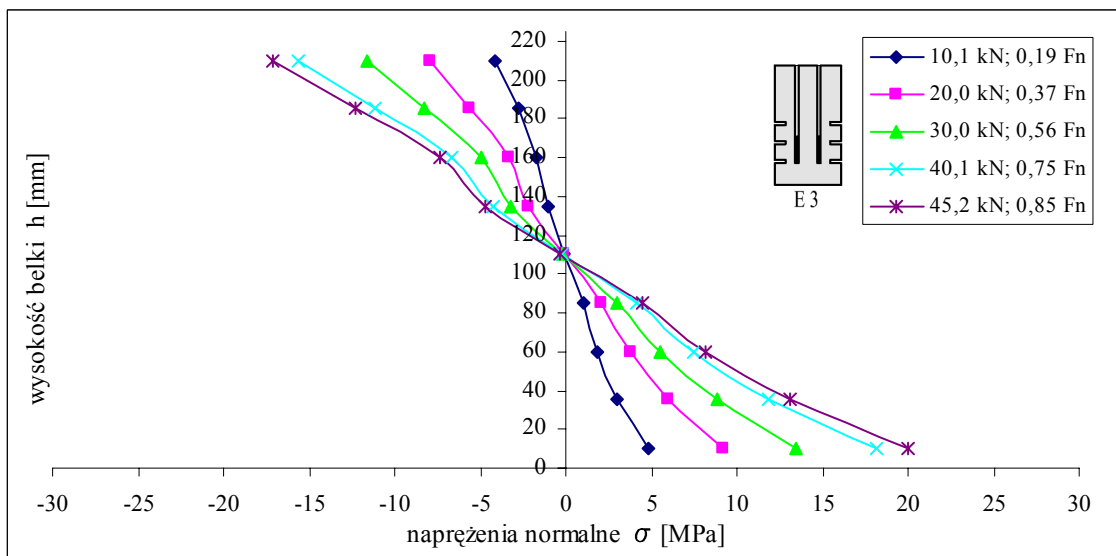
Rys. 4.105. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka E3



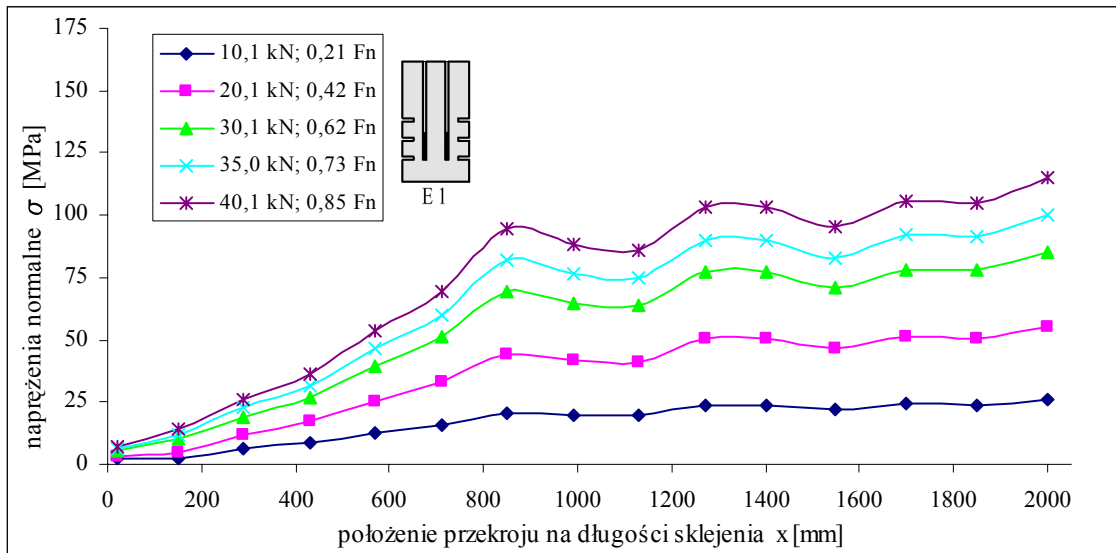
Rys. 4.106. Naprężenia normalne w drewnie - belka E1



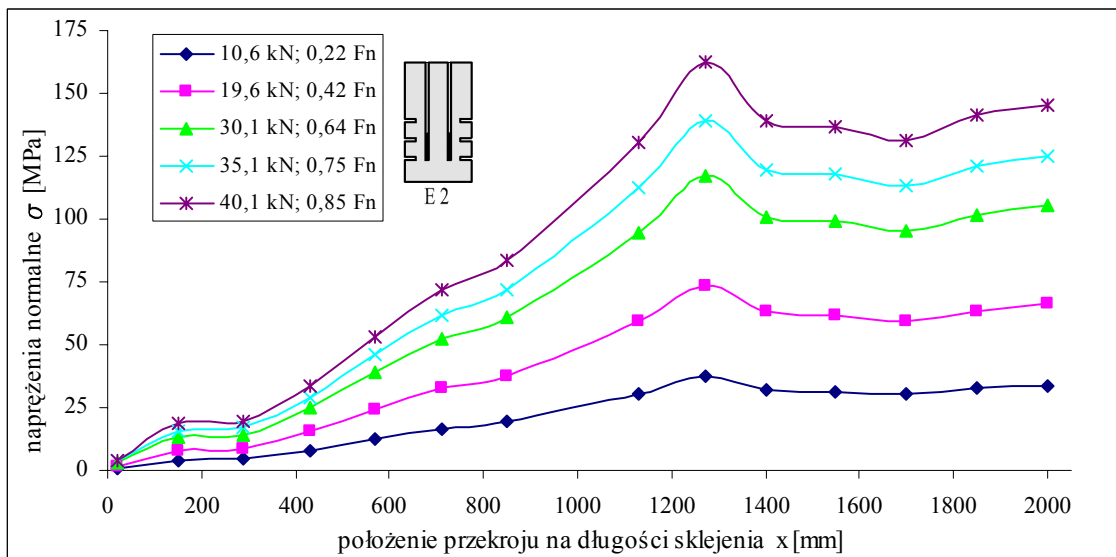
Rys. 4.107. Naprężenia normalne w drewnie - belka E2



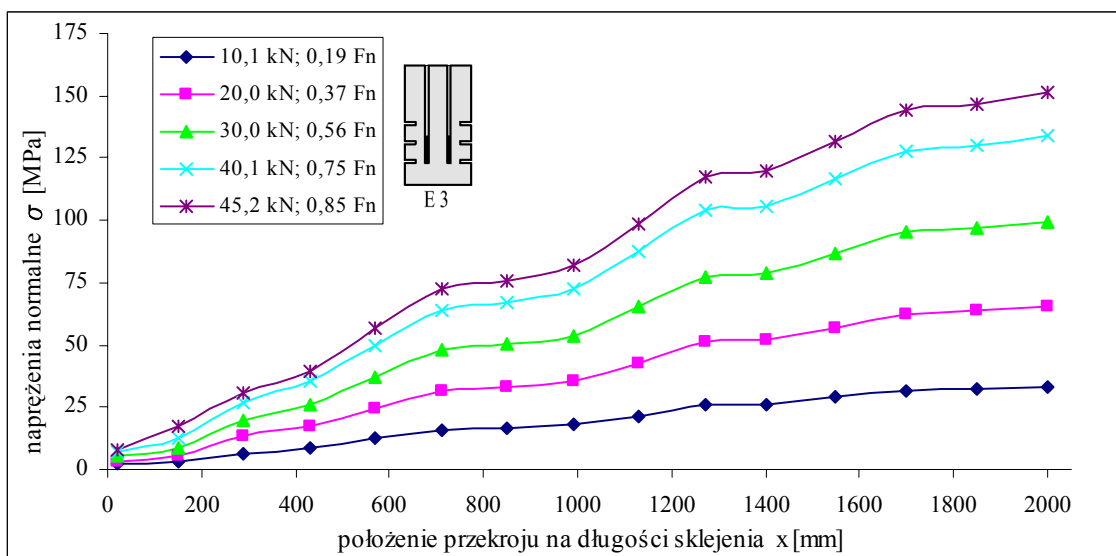
Rys. 4.108. Naprężenia normalne w drewnie - belka E3



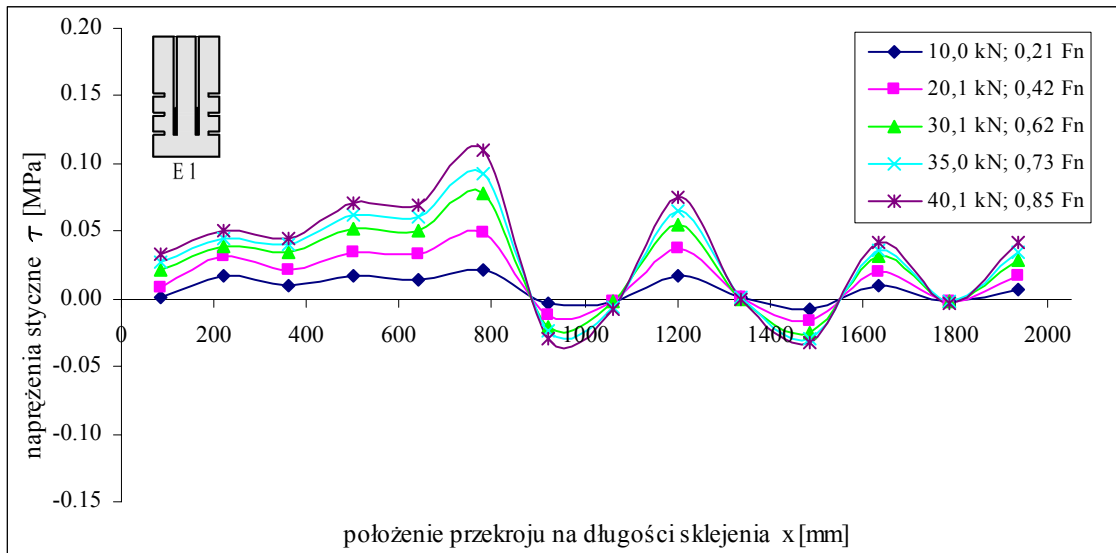
Rys. 4.109. Naprężenia normalne taśmie - belka E1



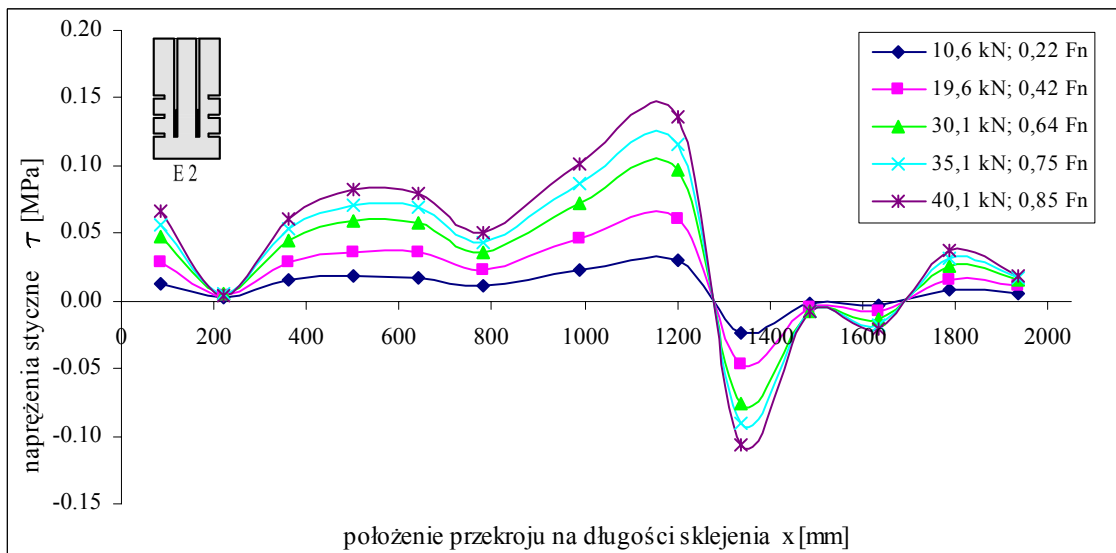
Rys. 4.110. Naprężenia normalne taśmie - belka E2



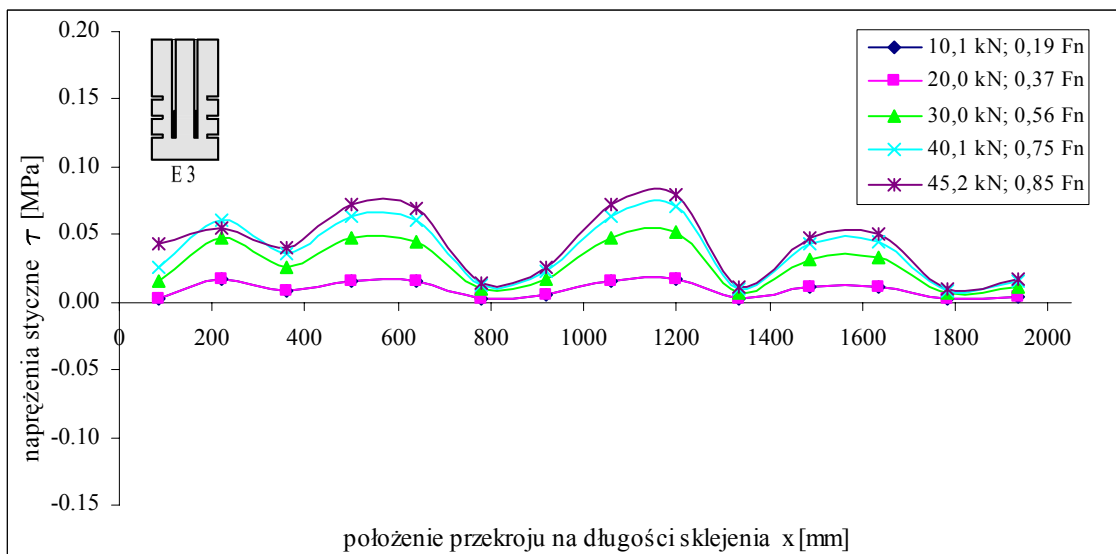
Rys. 4.111. Naprężenia normalne taśmie - belka E3



Rys. 4.112. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce E1

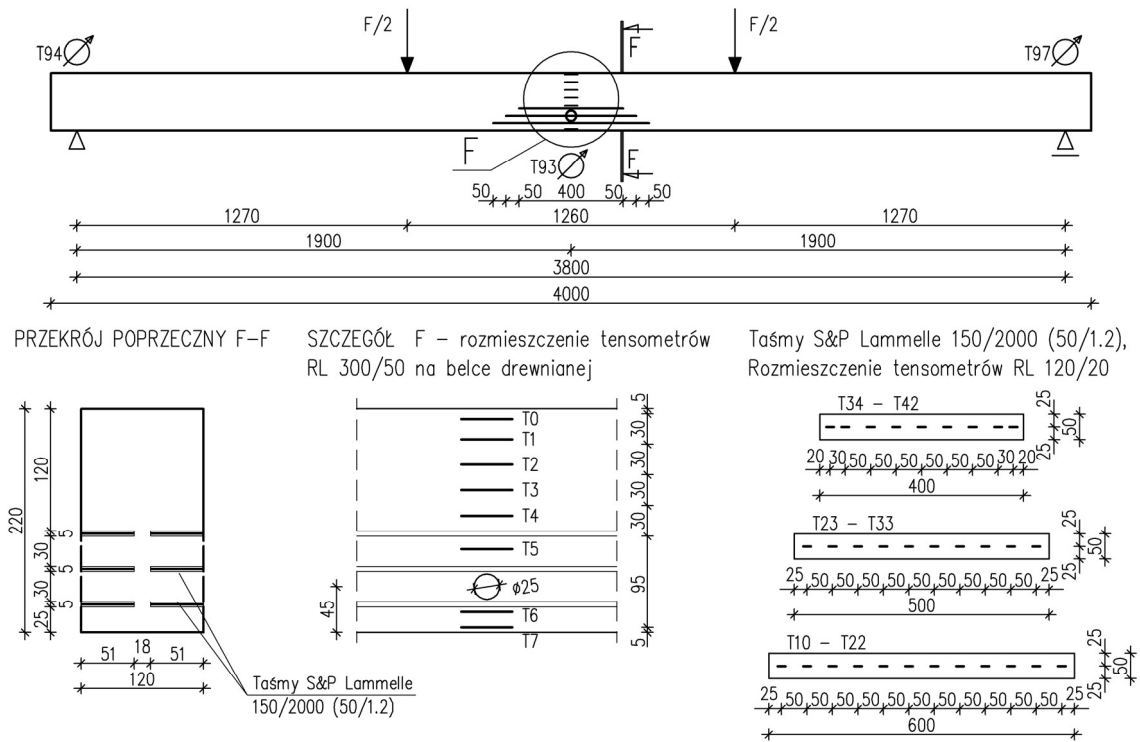


Rys. 4.113. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce E2

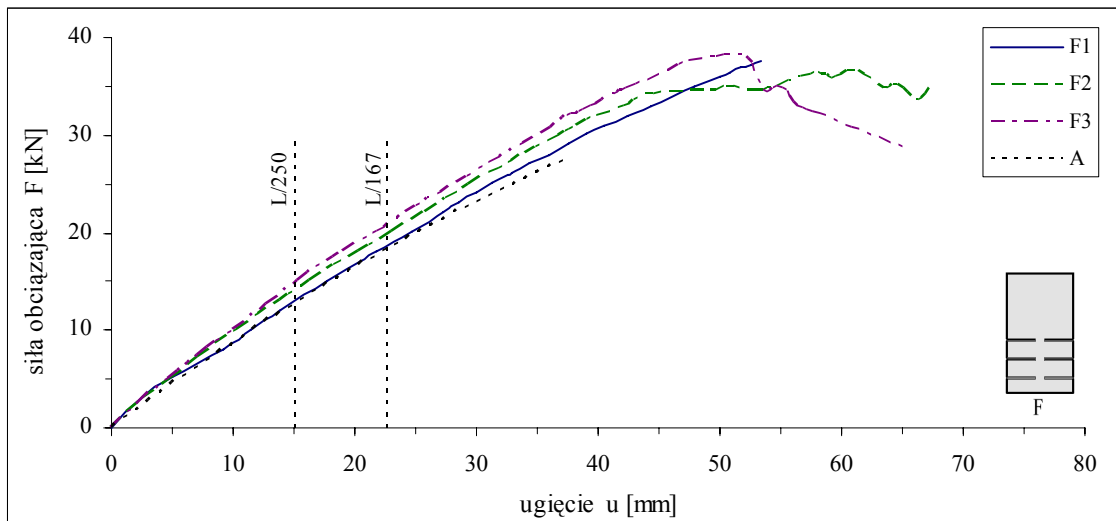


Rys. 4.114. Naprężenia styczne w spoinie - taśma w belce E3

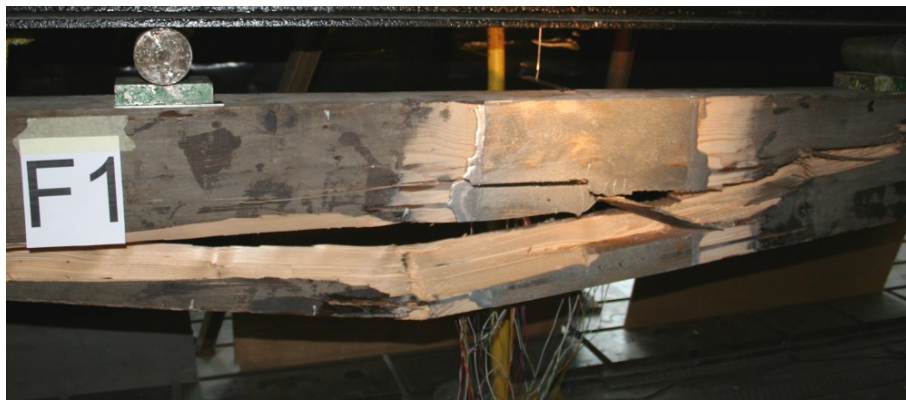
4.3.7. Wyniki badań belek serii F



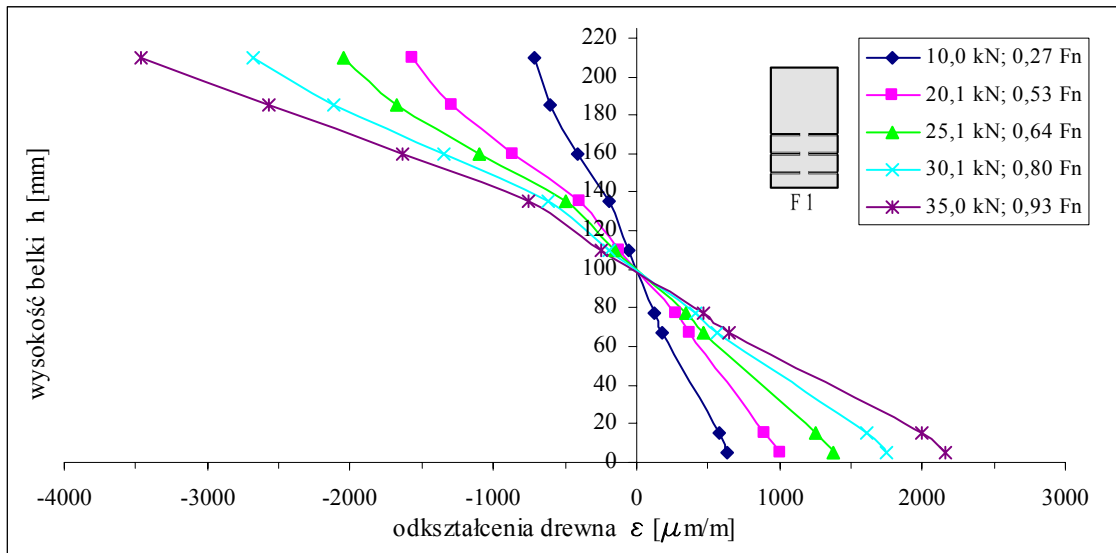
Rys. 4.115. Widok z boku i przekrój poprzeczny belek serii F



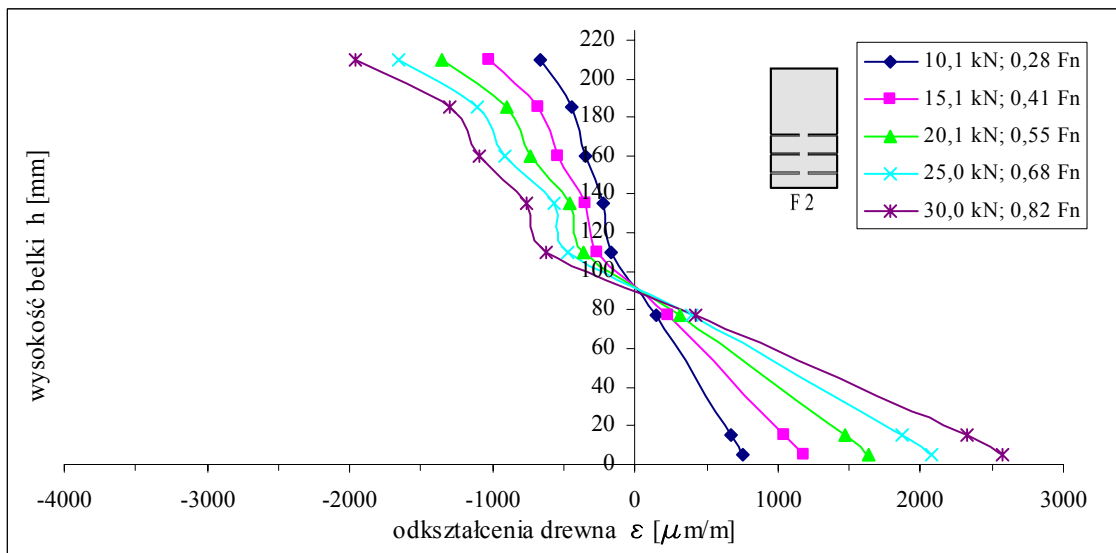
Rys. 4.116. Ścieżki równowagi belek serii F



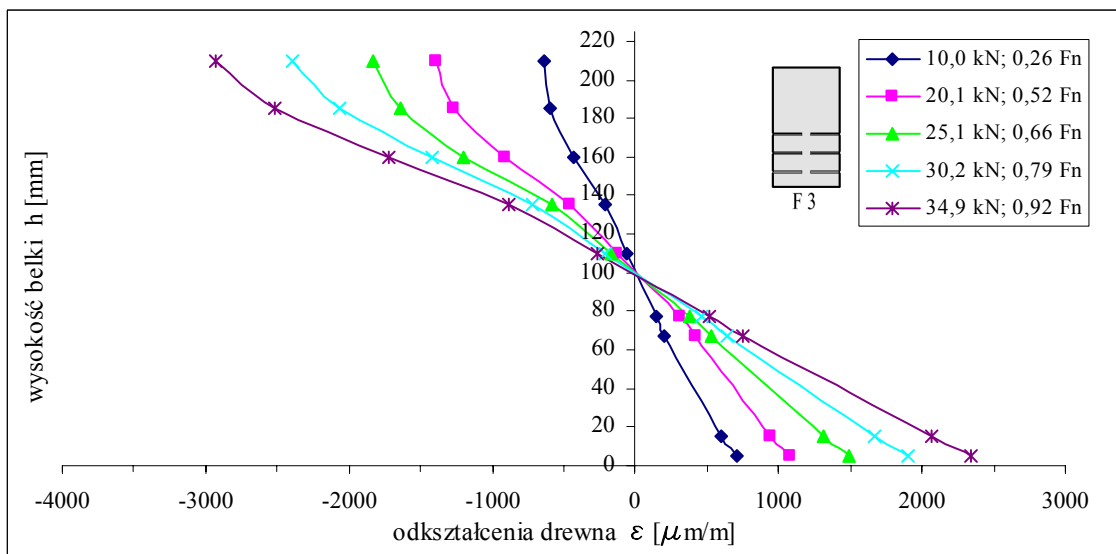
Rys. 4.117. Postać zniszczenia belki F1 (widoczna doklejona warstwa elastooptyczna)



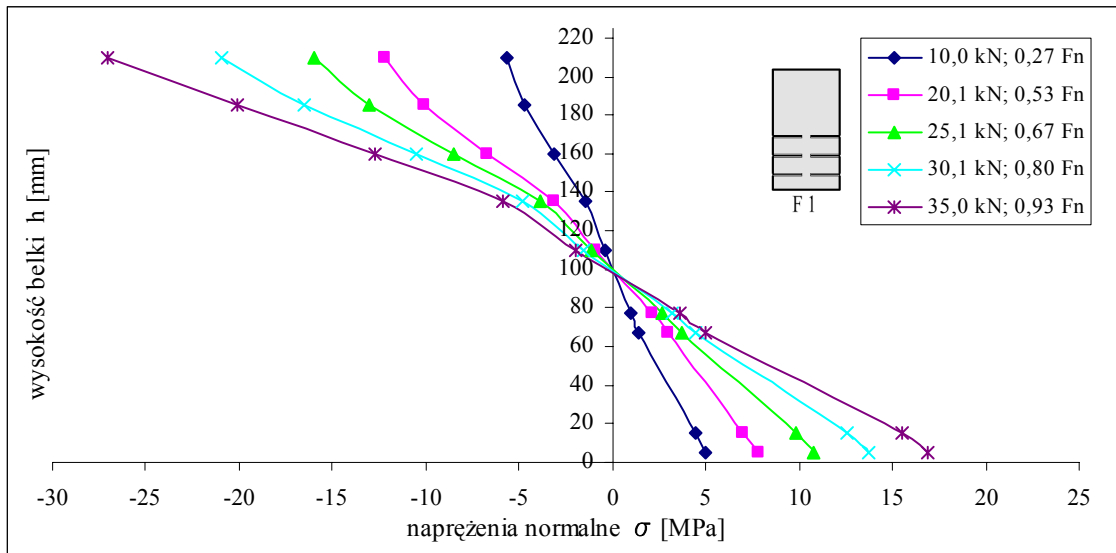
Rys. 4.118. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F1



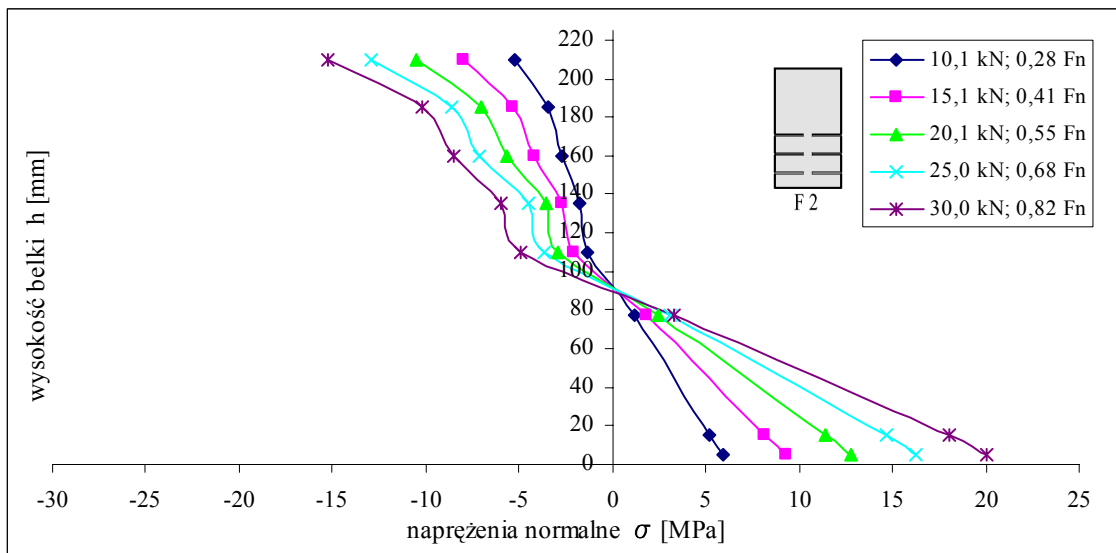
Rys. 4.119. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2



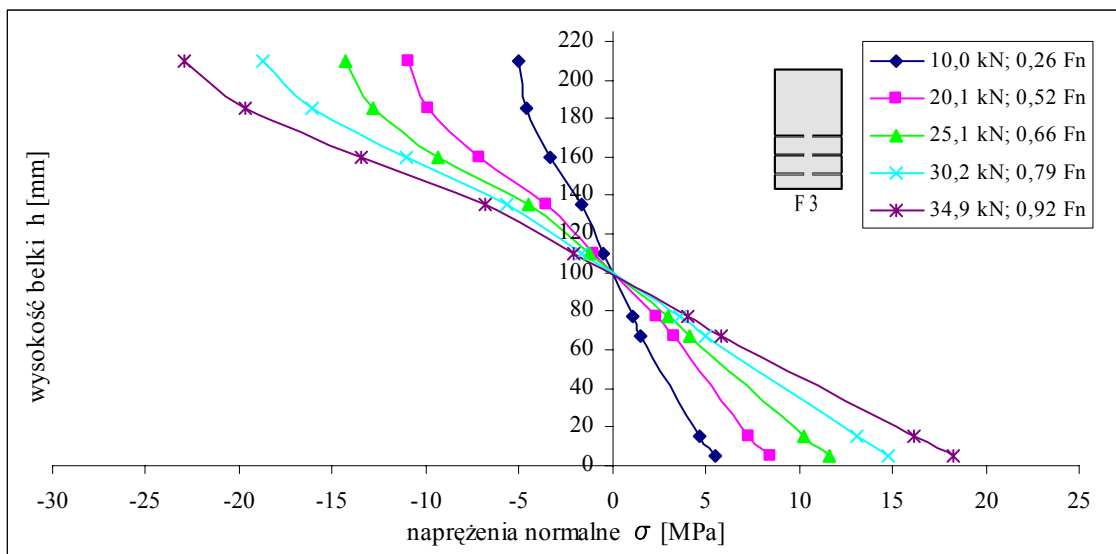
Rys. 4.120. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F3



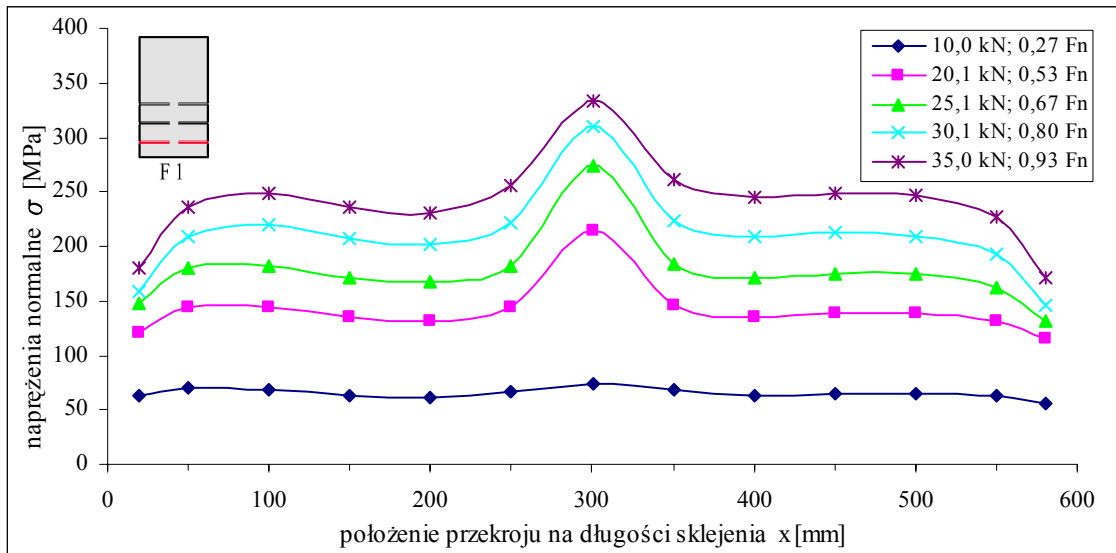
Rys. 4.121. Naprężenia normalne w drewnie - belka F1



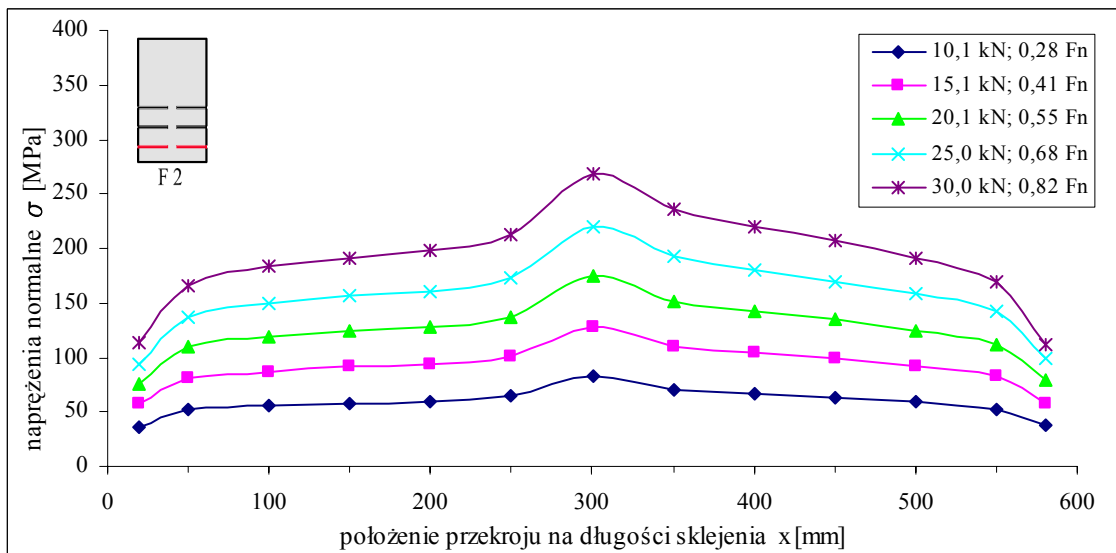
Rys. 4.122. Naprężenia normalne w drewnie - belka F2



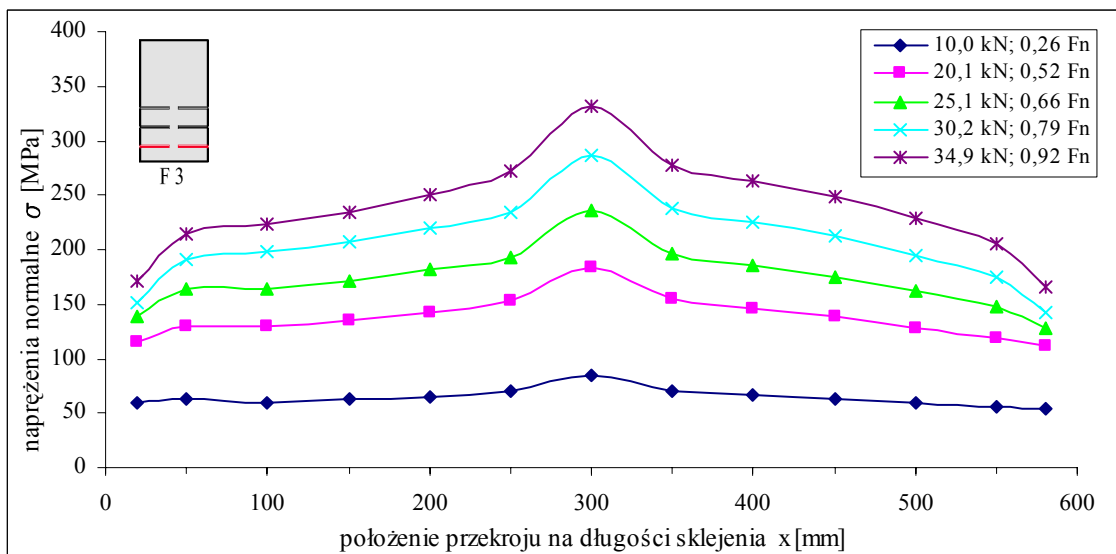
Rys. 4.123. Naprężenia normalne w drewnie - belka F3



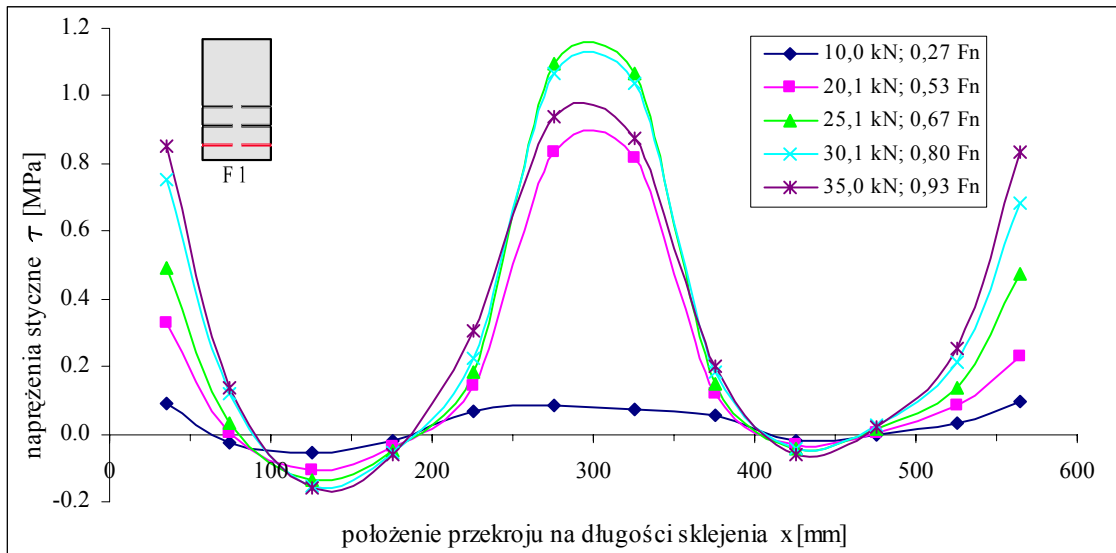
Rys. 4.123. Naprężenia normalne w dolnej taśmie - belka F1



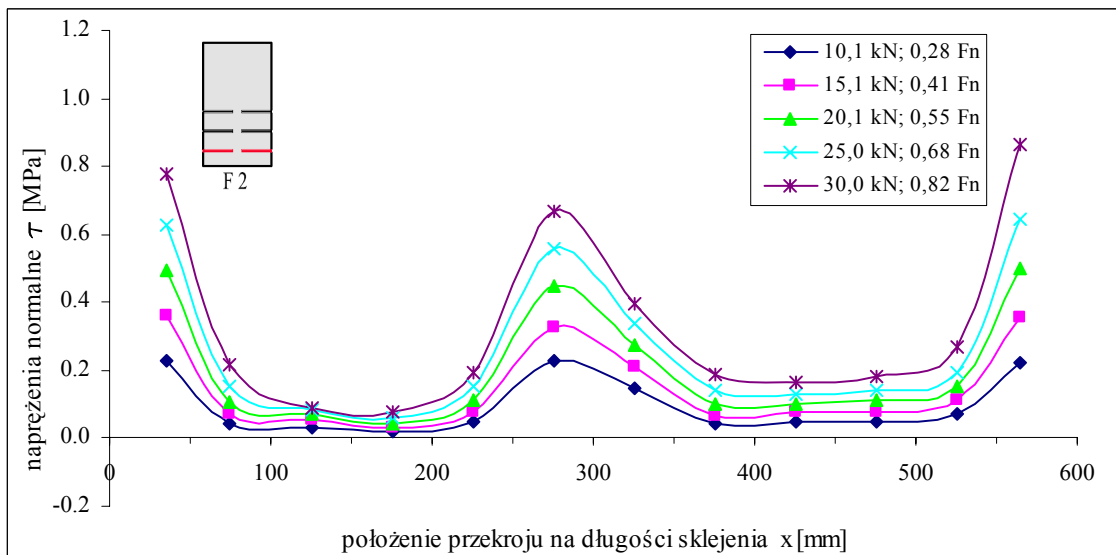
Rys. 4.124. Naprężenia normalne w dolnej taśmie - belka F2



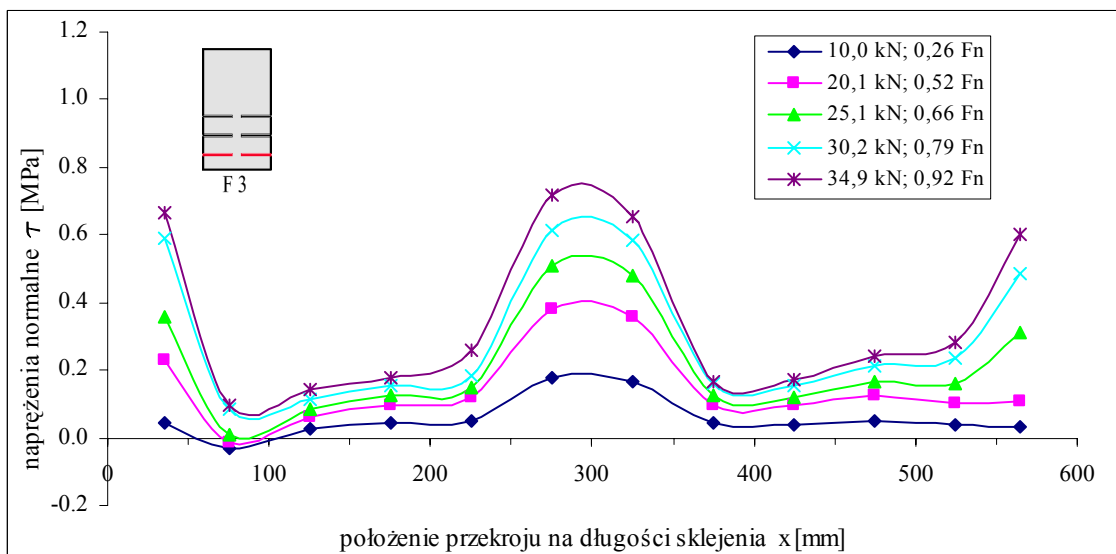
Rys. 4.125. Naprężenia normalne w dolnej taśmie - belka F3



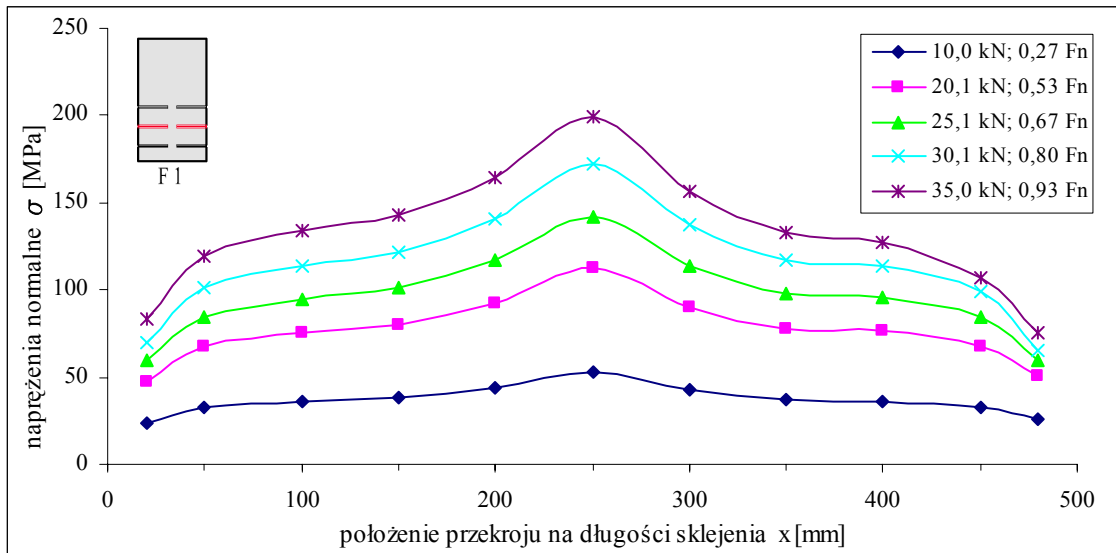
Rys. 4.126. Naprężenia styczne w spoinie - dolna taśma w belce F1



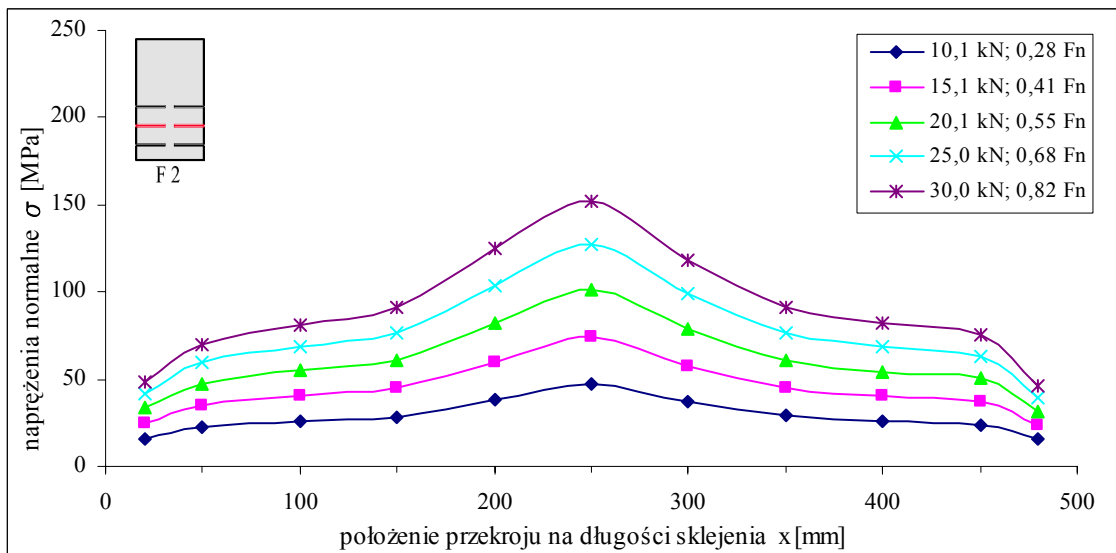
Rys. 4.127. Naprężenia styczne w spoinie - dolna taśma w belce F2



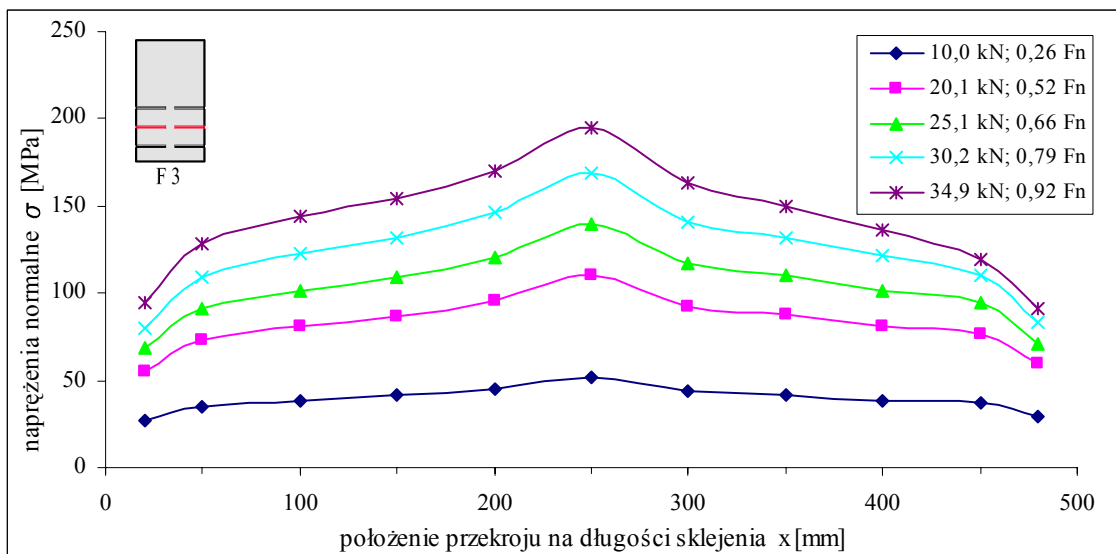
Rys. 4.128. Naprężenia styczne w spoinie - dolna taśma w belce F3



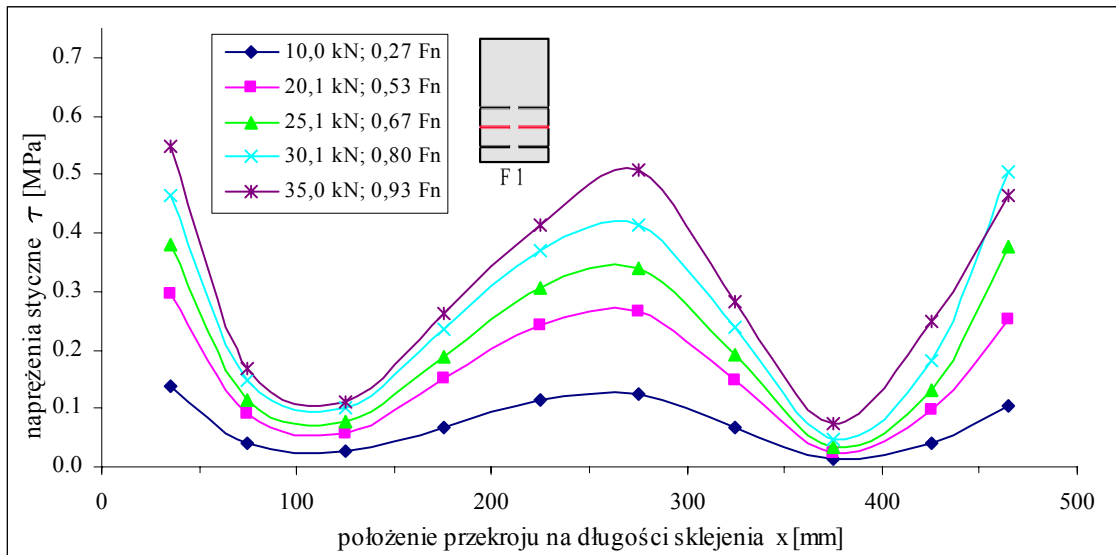
Rys. 4.129. Naprężenia normalne w środkowej taśmie - belka F1



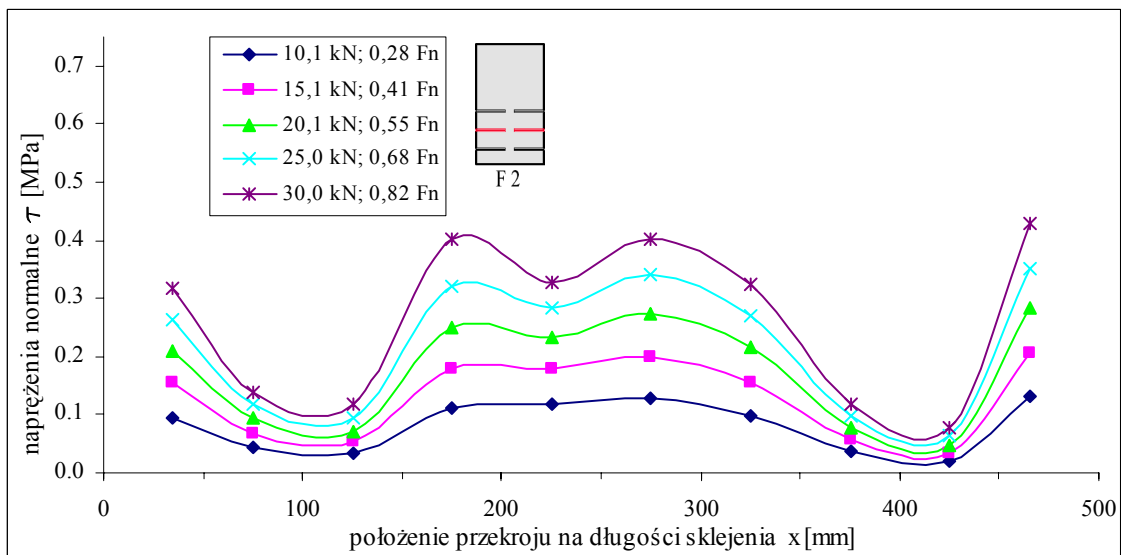
Rys. 4.130. Naprężenia normalne w środkowej taśmie - belka F2



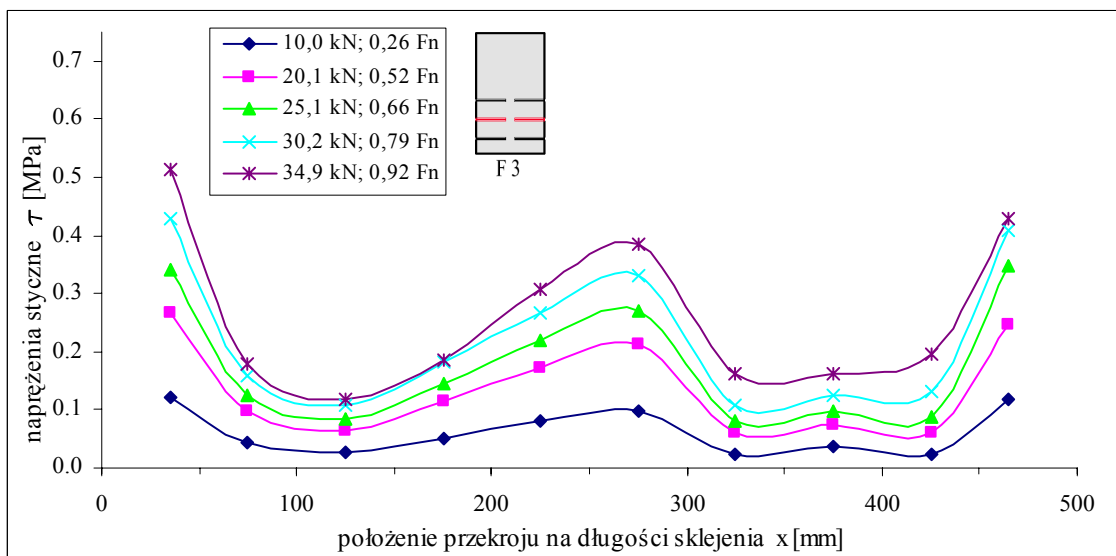
Rys. 4.131. Naprężenia normalne w środkowej taśmie - belka F3



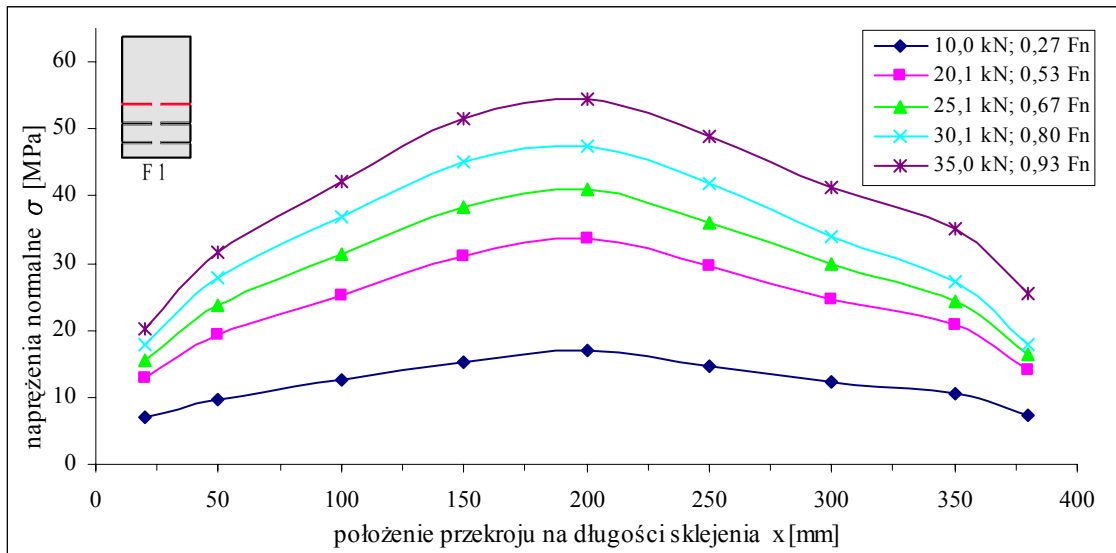
Rys. 4.132. Naprężenia styczne w spoinie - środkowa taśma w belce F1



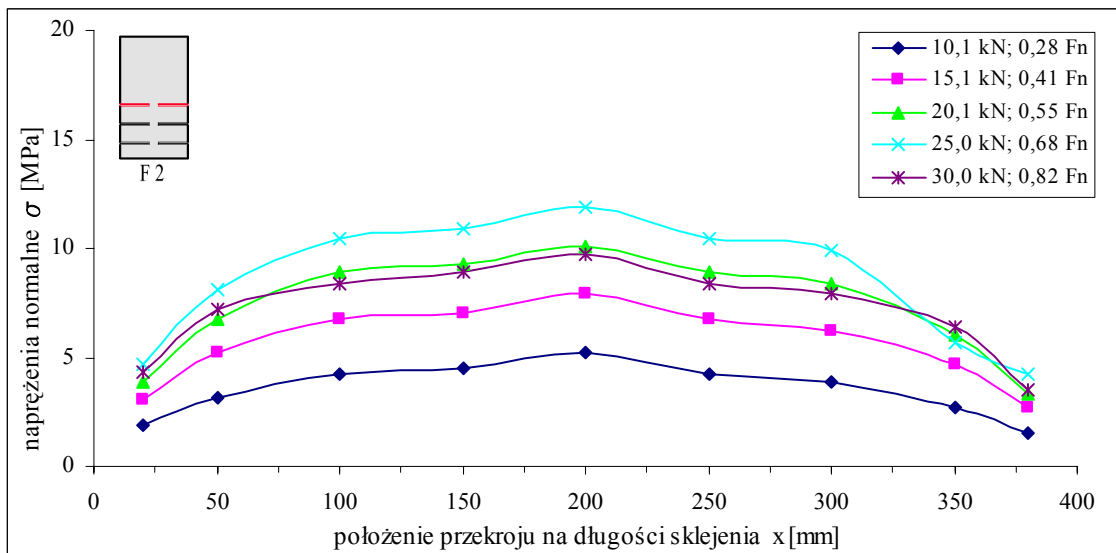
Rys. 4.133. Naprężenia styczne w spoinie - środkowa taśma w belce F2



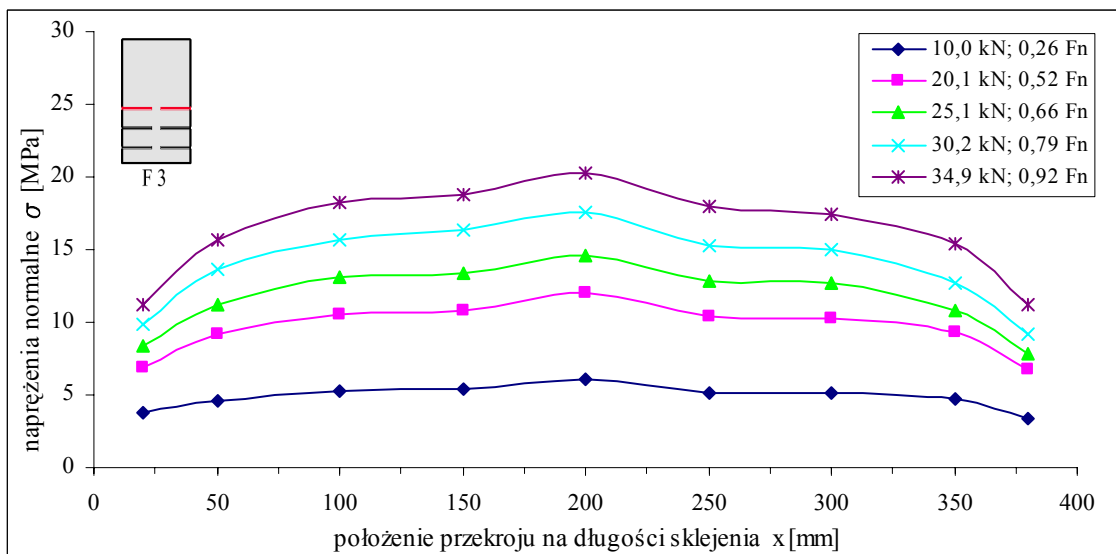
Rys. 4.134. Naprężenia styczne w spoinie - środkowa taśma w belce F3



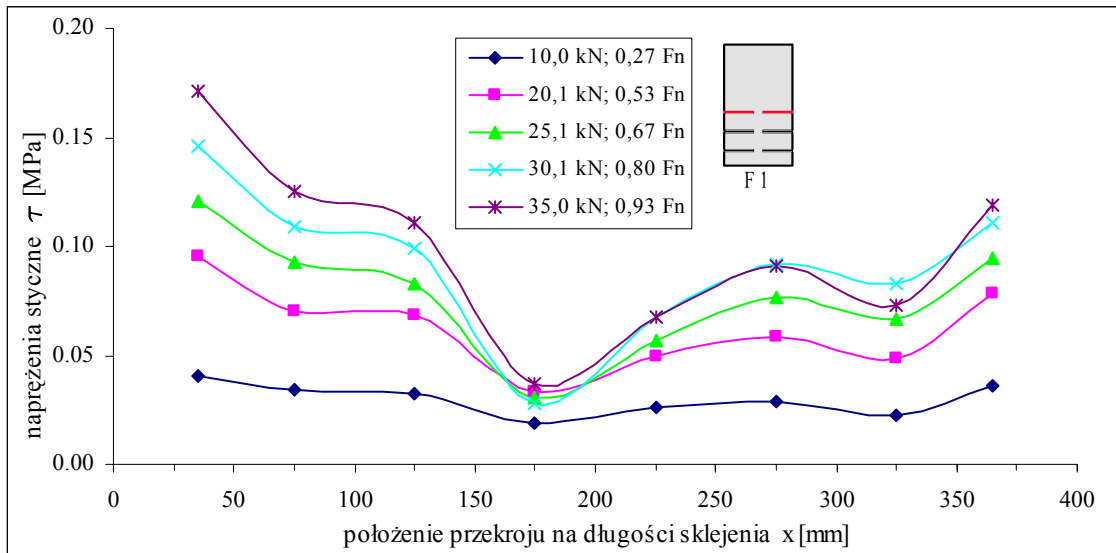
Rys. 4.135. Naprężenia normalne w górnej taśmie - belka F1



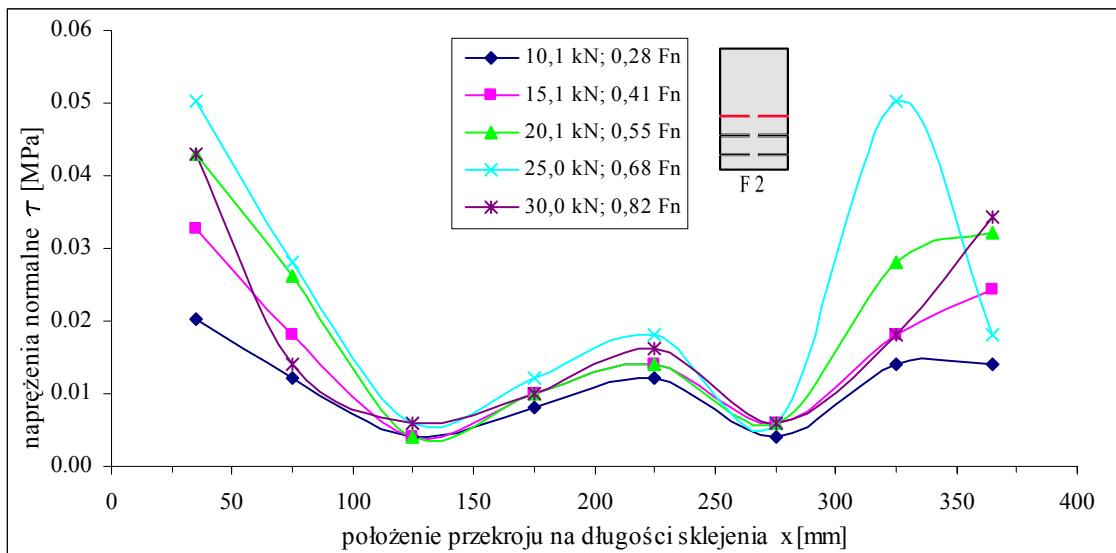
Rys. 4.136. Naprężenia normalne w górnej taśmie - belka F2



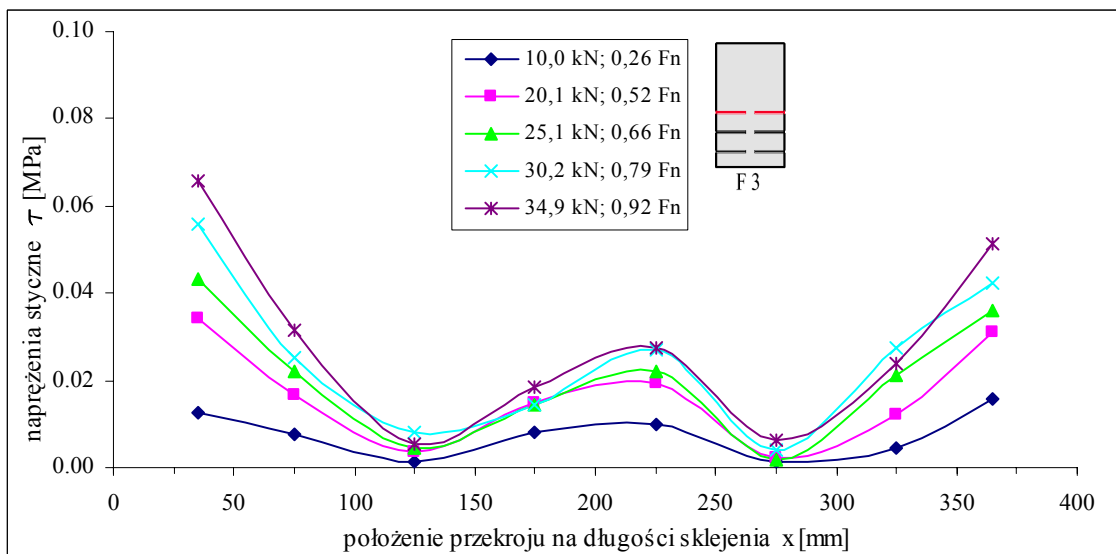
Rys. 4.137. Naprężenia normalne w górnej taśmie - belka F3



Rys. 4.138. Naprężenia styczne w spoinie - górna taśma w belce F1



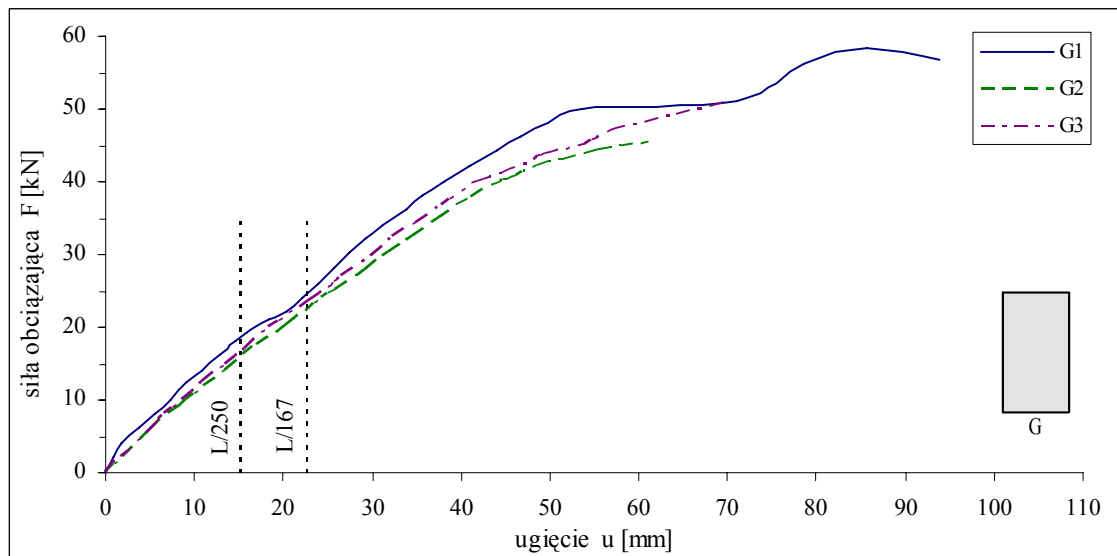
Rys. 4.139. Naprężenia styczne w spoinie - górna taśma w belce F2



Rys. 4.140. Naprężenia styczne w spoinie - górna taśma w belce F3

4.3.8. Wyniki badań belek serii G

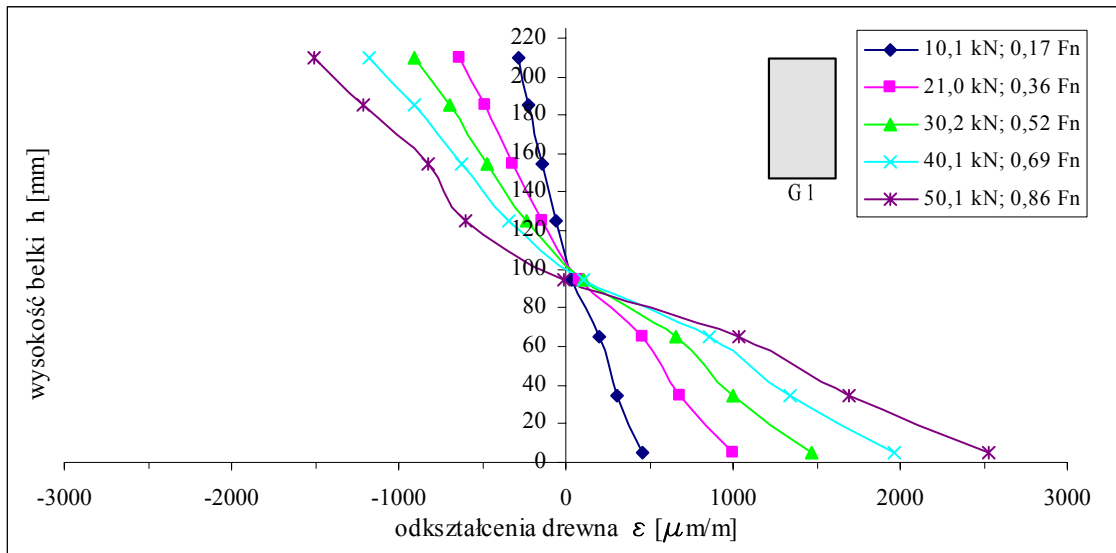
Belki serii G są belkami świadkowymi z nowego drewna o takich samych wymiarach przekroju poprzecznego oraz długości jak belki serii A, rys. 4,47.



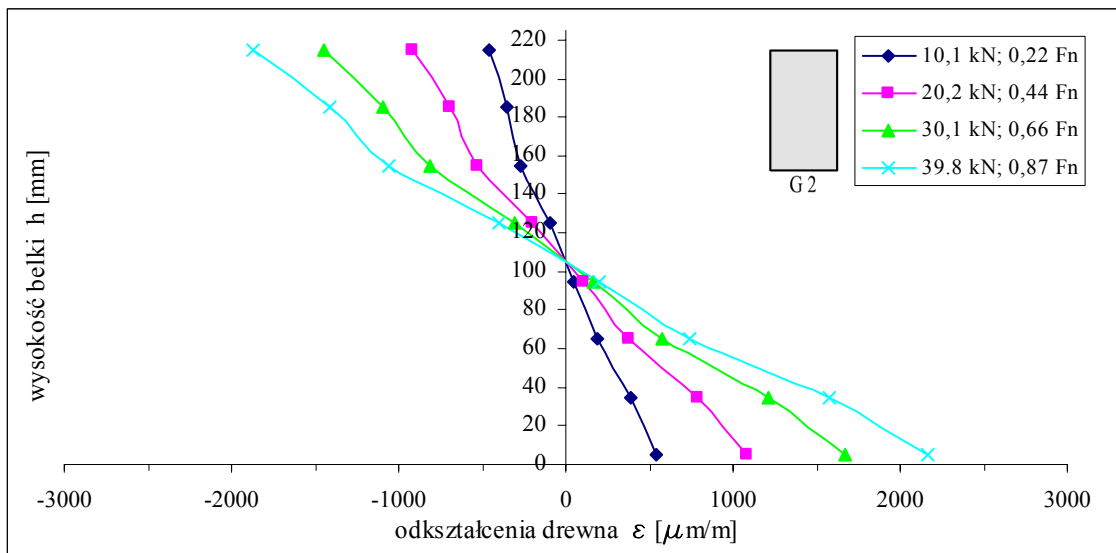
Rys. 4.141. Ścieżki równowagi belek serii G



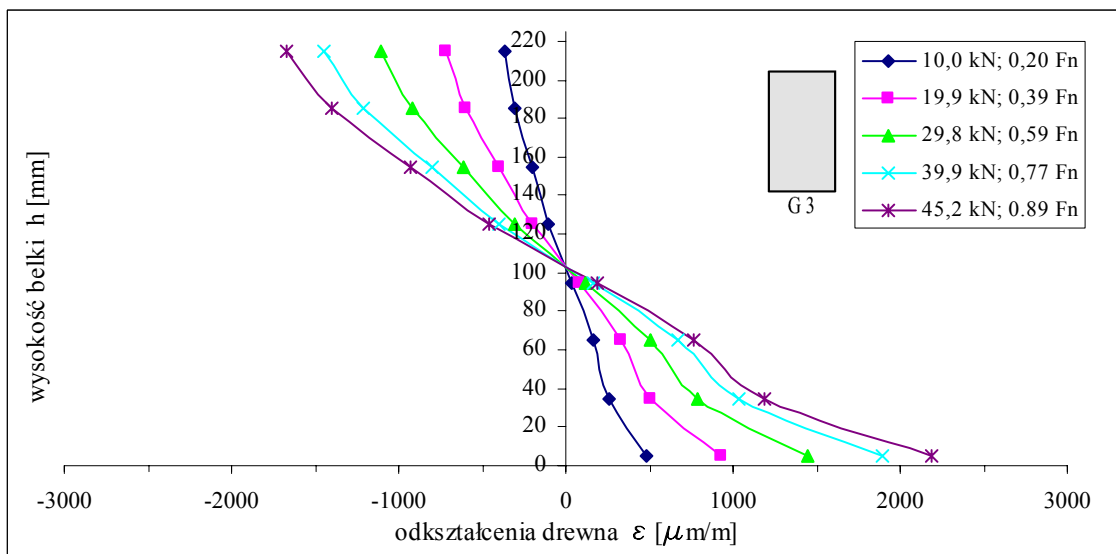
Rys. 4.142. Postać zniszczenia belki G1



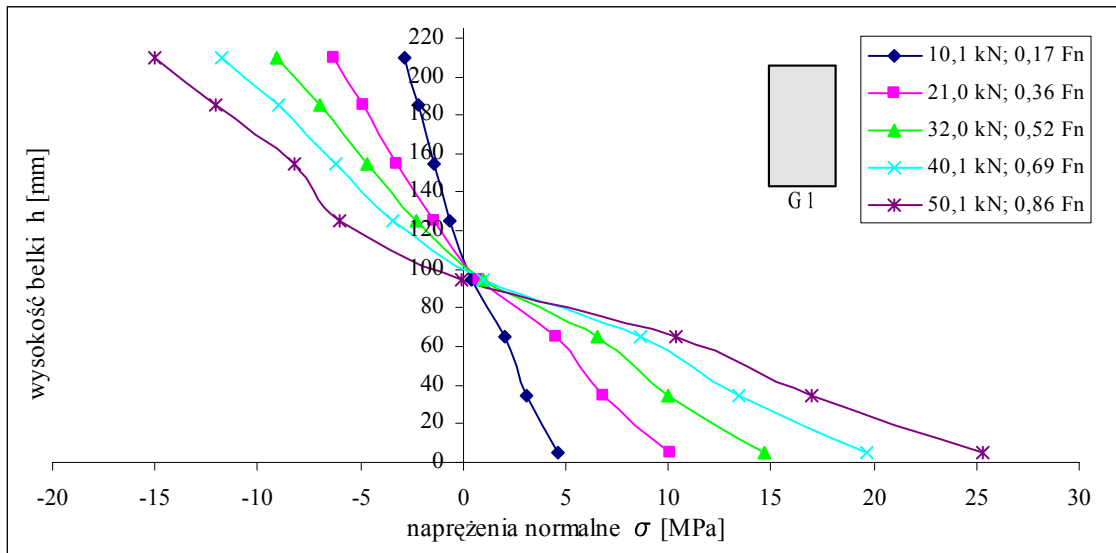
Rys. 4.143. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka G1



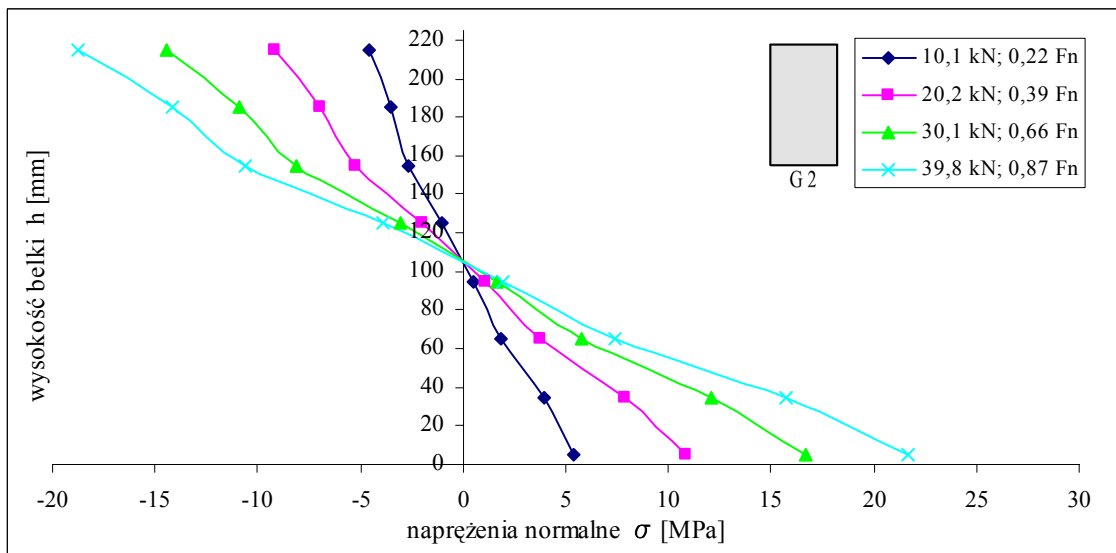
Rys. 4.144. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka G2



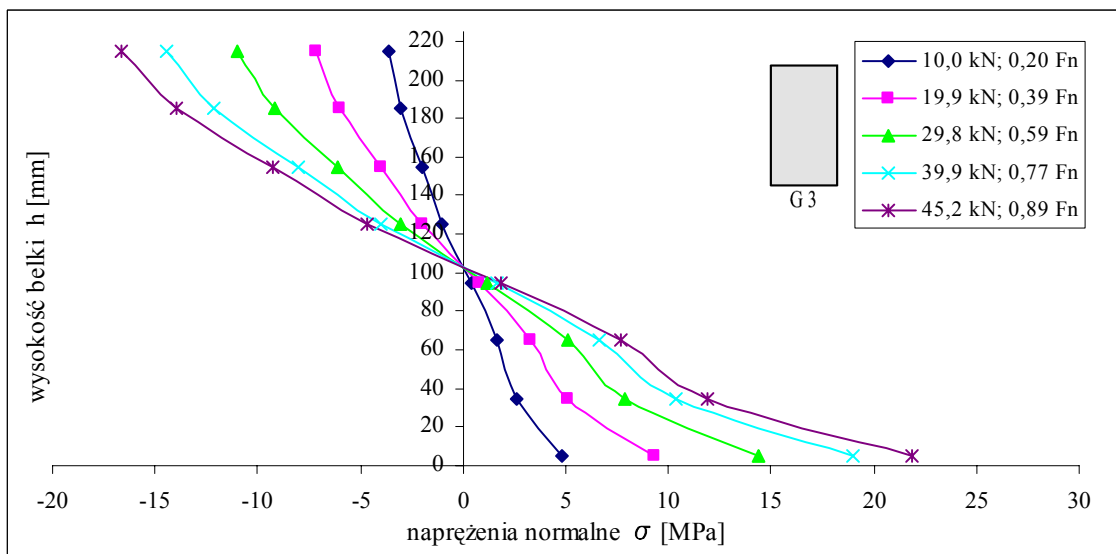
Rys. 4.145. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka G3



Rys. 4.146. Naprężenia normalne w drewnie - belka G1



Rys. 4.147. Naprężenia normalne w drewnie - belka G2



Rys. 4.148. Naprężenia normalne w drewnie - belka G3

4.3.9. Wnioski

Badania zostały przeprowadzone na 21 modelach w skali technicznej. Taśmy kompozytowe CFRP umieszczono wewnątrz przekroju drewnianego, co ma znaczenie w przypadku wzmocnienia bogato dekorowanych, historycznych belek stropowych. W literaturze przedmiotu nie opisano dotąd podobnego sposobu wzmocnienia historycznych belek stropowych materiałami CFRP (poza belką F - rozdz. 3). Z punktu widzenia pracy statycznej elementu zespolonego najwłaściwszym rozwiązaniem byłoby doklejenie taśmy do spodu belki (w strefie włókien rozciąganych), jednak takie rozwiązanie nie jest do zaakceptowania w konserwacji konstrukcyjnej historycznych elementów drewnianych ze względów doktrynalnych.

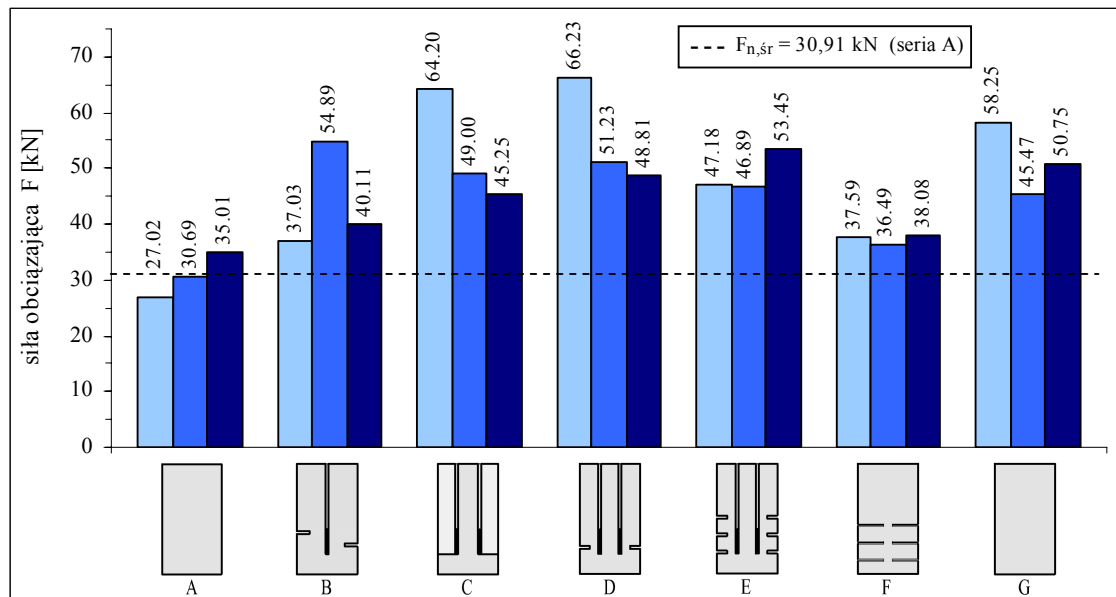
Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wzmocnianie drewnianych elementów zginanych przy użyciu taśm CFRP wpływa korzystnie na ich nośność i sztywność. Na rys. 4.149 pokazano wartości siły niszczącej dla wszystkich badanych belek (poziomą linią przerywaną zaznaczono wartość średniej siły niszczącej dla belek świadkowych serii A.), zaś w tabeli 4.21 zestawiono średnie wartości sił niszczących dla każdej serii oraz procentowy wzrost nośności w stosunku do serii belek niewzmocnionych - A. Wzrost nośności badanych elementów wzmocnionych taśmami CFRP jest znaczący, wyniósł bowiem od 21% dla belek serii F do nieco ponad 79% dla belek serii D. Widoczny jest jednak dość duży rozrzut pomiędzy wartościami siły niszczącej dla poszczególnych modeli, zwłaszcza dla belek serii B, C, D dla których wartości maksymalne i minimalne spośród trzech prób różnią się od siebie o 35-48 %. Jednakże na przykładzie belek niewzmocnionych ze starego jak i nowego drewna (seria A i G), gdzie różnica pomiędzy skrajnymi wartościami wynosi ok. 30%, wyraźnie widoczne są różnice nośności wynikające z różnej budowy drewna oraz wpływu wad. Wyniki dla serii F, są bardzo do siebie zbliżone, co dla pełnowymiarowych litych przekrojów drewnianych należy uznać za wyjątkowe.

Tab. 4.21. Średnie wartości siły niszczącej dla każdej serii oraz wzrost nośności w stosunku do belki bez wzmocniona

	Seria belek						
	A	B	C	D	E	F	G
Średnia siła niszcząca [kN]	30,91	44,01	52,82	55,42	49,17	37,39	51,49
Wzrost nośności [%]	-	42,4	70,9	79,3	59,1	21,0	-

Tab. 4.22. Wartości ugięć badanych belek dla siły różnych poziomów obciążenia

	Seria belek						
	A	B	C	D	E	F	G
Ugięcie w środku rozpiętości przy obciążeniu $F=25$ kN u [mm]	34,29	27,00	24,70	23,36	31,06	31,26	22,94
	31,57	27,49	26,36	26,61	24,06	29,41	25,80
	30,75	21,58	30,41	24,85	26,30	28,18	24,52
Ugięcie w środku rozpiętości przy obciążeniu $F=30$ kN u [mm]	-	33,22	29,53	29,00	37,88	38,95	27,26
	39,88	33,62	33,05	32,41	29,55	36,81	31,66
	42,59	25,75	36,96	30,50	32,27	34,99	30,07



Rys. 4.149. Wartości siły niszczącej badanych elementów

Podstawowe dane pozwalające na ocenę wyników badań przedstawionych w rozdz. 4.3 zestawiono na rys. 4.149 i w tab. 4.55, 4.56. Poniżej sformułowano wnioski prowadzące uogólnienia uzyskanych wyników.

Reasumując:

- 1) Belki do badań wybrano losowo mając na uwadze realną sytuację, w której pracują historyczne elementy wbudowane.
- 2) Badania potwierdziły możliwość stosowania wkładek z taśm CFRP wprowadzanych do wnętrza przekroju do wzmocnienia drewnianych belek historycznych. Podkreślenia wymaga fakt, iż modele badawcze przygotowano mając na uwadze praktyczne wykorzystanie badanych technik w konserwacji konstrukcyjnej, tzn. wprowadzanie wkładek wzmocniających miało miejsce od strony strefy ściskanej belek lub od strony ich płaszczyzn bocznych. Pierwszy sposób jest użyteczny dla przypadków, w których na trzech widocznych płaszczyznach belki znajdują się wartościowe polichromie, drugi umożliwia dokonanie transferu płaszczyzn bocznych polichromowanych, wzmocnienie przekroju i ponowny powrót elementów odciętych na czas wklejenia wkładek wzmocniających.
- 3) Maksymalny wzrost nośności i sztywności przekrojów po wzmocnieniu uzyskano dla belek serii C i D co dobrze koresponduje z celem badań opisanym we wniosku 2.
- 4) Najniższy wzrost nośności i sztywności przekrojów po wzmocnieniu uzyskano dla belek serii B i E. W przypadku belek serii B, poza oczywistym wpływem mniejszego przekroju wkładki wzmocniającej (jedna wkładka) w stosunku do belek serii C i D (dwie wkładki) uwidocznił się wpływ liczby wkładek wzmocniających w przekroju i ich rozmieszczenia co niewątpliwie wpływa na „uporządkowanie” odkształceń włóknistej struktury drewna w pracy statycznej przekroju zespolonego. Widoczne jest to na wykresach naprężeń w drewnie. Natomiast w przypadku belek serii E celowo wykonano nacięcia pod kątem w stosunku do przebiegu włókien w przekroju. Była to próba modelowania nieciągłości i skrętu włókien występujących w przęsłach wbudowanych elementów konstrukcji. Porównując wyniki uzyskane dla belek serii D i E w belkach serii E wystąpiło zmniejszenie efektu wzmocnienia, w zakresie nośności, o około 30 % co potwierdza ilościowo wpływ tych defektów struktury

drewna na nośność przekroju podawany w literaturze, [136]. Niewątpliwie dla dalszego rozwoju wiedzy o opisanych w rozprawie technikach wzmocniania istotny byłby program badawczy zmierzający do określenia optymalnej ilości wkładek wzmocniających w przekroju drewnianym oraz ich optymalnego rozmieszczenia.

- 5) Metoda wzmocnienia zaproponowana w belkach serii F miała na celu naukowe dowiedzenie, iż przy jej pomocy możliwe jest bezpieczne wyeliminowanie wpływu defektów struktury drewna (otwory po sękach) na nośność i sztywność przekroju.
- 6) Oceniając efektywność badanych technik wzmocniających z zastosowaniem wkładek CFRP należy zauważyć, że jest ona zbliżona wartościowo do technik, w których jako wkładek wzmocniających używa się wkładek stalowych z prętów żebrowanych czy też blach płaskich (badania Jasięki, [113]). Pracy przekrojów zespolonych towarzyszy tu jednak znacznie mniejszy stopień wykorzystania przekroju samych wkładek. W przypadku ciągłych wkładek stalowych jest on bliski 100% (w zakresie sprężystym), natomiast w przypadku wkładek CFRP nie przekracza on nigdy 12%. Biorąc pod uwagę, iż opisywane techniki stanowią podmiot rozprawy w zakresie zastosowań w obiektach dziedzictwa, obiektach, których trwanie nie może być limitowane czasem ma to pozytywny wpływ na pracę przekrojów zespolonych pod mającym tu miejsce obciążeniem długotrwałym, a także wobec zachodzących w czasie zjawisk reologicznych. System występujący w przekroju zespolonym: „drewno-spoina klejowa-taśma” może być modyfikowany w obszarze spoiny klejowej i przybiera postać odkształcenia globalnego z zachowaniem zależności $\varepsilon_f < \varepsilon_k \geq \varepsilon_d$. Program badawczy ukierunkowany na określenie wpływu na pracę przekroju wzmocnianego w czasie relacji pomiędzy odkształceniem jednostkowym taśmy CFRP a drewnem i spoiną klejową byłby tu również pożądany.
- 7) Przekrój taśmy zostaje wykorzystany, w znacznie większym stopniu, po zniszczeniu drewna, przy braku przyrostu siły. Najwłaściwszym rozwiązaniem wydaje się być wstępne sprężenie taśm co pozwala na znaczne wykorzystanie ich nośności, a co za tym idzie na zwiększenie efektywności wzmocnienia. Takie rozwiązanie jest jednak właściwie niemożliwe przy wzmocnianiu zabytkowych belek stropowych.
- 8) Czynnikiem ograniczającym zastosowanie wkładek CFRP w omawianych przypadkach wzmocnień jest ich koszt. Biorąc jednak pod uwagę szybki rozwój inżynierii materiałowej a także konieczny, wobec założenia o pełnej adhezji kleju do powierzchni wkładki wzmocniającej, sposób przygotowania do klejenia powierzchni np.: wkładek stalowych (rozwiniecie powierzchni przez piaskowanie) ekonomia procesu wzmocniania przy użyciu wkładek CFRP powinna ulegać zmianie na korzyść. Założenie o pełnej adhezji kleju do powierzchni wkładek wzmocniających ma istotny wpływ na postać zniszczenia przekrojów wzmocnionych i stanowi podstawę dla wielu rozwiązań analitycznych szacowania nośności połączeń „drewno-klej-wkładka wzmocniająca”.
- 9) Przedstawione wyniki badań pozwalają również na jednoznaczne stwierdzenie możliwości odtworzenia pierwotnej nośności i sztywności belek starych w przypadku ich rehabilitacji metodami w oparciu o modele C i D. Nośność belek serii C i D po rehabilitacji przekroju wyniosła odpowiednio: 52,82 kN i 55,42 kN i była wyższa od nośności belek świadkowych wykonanych z drewna nowego (seria G, nośność 51,49 kN).

4.4. ELASTOOPTYCZNE BADANIA WYBRANYCH MODELI PO WZMOCNIENIU

4.4.1. Wprowadzenie

Zastosowanie metody elastoptycznej jest możliwe w badaniach obiektów rzeczywistych wykonanych z materiałów nie wykazujących efektu dwójłomności wymuszonej. Technika pomiaru, polegająca na naniesieniu na powierzchnię badanego obiektu cienkiej warstwy materiału dwójłomnego (tzw. elastoptycznej warstwy powierzchniowej), a następnie obserwacji w świetle odbitym efektów optycznych wywołanych odkształceniami badanej powierzchni, nosi nazwę *techniki (metody) elastoptycznej warstwy powierzchniowej* (TEWP). Zaletą TEWP jest możliwość pomiaru odkształceń na powierzchni obiektu wykonanego z rodzimego materiału (bez konieczności budowy modelu fizycznego), [7], [16], [53], [87], [103], [121].

Podstawowe związki między naprężeniami i odkształceniami a efektami optycznymi w warstwie powierzchniowej opierają się na założeniu, że odkształcenia występujące na powierzchni konstrukcji przekazywane są wprost na warstwę naklejoną na tę powierzchnię, co wyrażają równania:

$$\varepsilon_1^w = \varepsilon_1^k, \quad \varepsilon_2^w = \varepsilon_2^k, \quad \text{przy } \sigma_3 = 0 \quad (4.3)$$

gdzie: $\varepsilon_1^w, \varepsilon_2^w$ - odkształcenia główne (na kierunkach głównych) w warstwie powierzchniowej,
 $\varepsilon_1^k, \varepsilon_2^k$ - odkształcenia główne na powierzchni konstrukcji,

stąd:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^w = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^k \quad (4.4)$$

a po uwzględnieniu podstawowego równania elastoptyki (4.5):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N \cdot f_\sigma \quad (4.5)$$

gdzie: σ_1, σ_2 - główne naprężenia normalne,
 N - rzędna izochromy,
 f_σ - stała - naprężeniowa wartość rzędu izochromy,

z faktu prowadzenia obserwacji w świetle odbitym, otrzymuje się zależność między różnicą odkształceń głównych oraz efektem optycznym (rzędem izochromy) w warstwie:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^w = \frac{(1 + \nu^w) \cdot N \cdot f_\sigma}{2 \cdot t^w E^w} = \frac{N \cdot f_\varepsilon}{2 \cdot t^w} \quad (4.6)$$

gdzie: ν^w - współczynnik Poissona warstwy powierzchniowej,
 t^w - grubość warstwy powierzchniowej,
 E^w - moduł Younga warstwy powierzchniowej,
 f_ε - stała - odkształceniowa wartość rzędu izochromy,

Bezpośrednio z danych elastoptycznych (N i α) można wyznaczyć także odkształcenie postaciowe:

$$\gamma_{xy}^k = \gamma_{xy}^w = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^w \cdot \sin 2\alpha = \frac{N \cdot f_\varepsilon \cdot \sin 2\alpha}{2 \cdot t^w} \quad (4.7)$$

gdzie: α - parametr izokliny, kąt nachylenia jednego z kierunków głównych względem układu odniesienia (osi z),

W zakresie liniowo-sprężystych odkształceń, naprężenia na powierzchni badanego obiektu określają wzory:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^k = \frac{E^k \cdot N \cdot f_\varepsilon}{2 \cdot t^w \cdot (1 + \nu^k)} \quad (4.8)$$

oraz

$$\tau_{xy}^k = \frac{E^k \cdot N \cdot f_\varepsilon \cdot \sin 2\alpha}{4 \cdot t^w \cdot (1 + \tau^k)} \quad (4.9)$$

gdzie: E^k - moduł Younga materiału konstrukcji,
 ν^k - współczynnik Poissona materiału konstrukcji,
 τ_k - naprężenia styczne w konstrukcji.

Powyższe zależności są prawdziwe dla cienkich warstw, rzędu dziesiątych części milimetra. W praktyce, jedynie w badaniach niektórych zjawisk (np. uplastycznienia metali) stosuje się warstwy o tak małej grubości. W ogólnym przypadku, m.in. ze względu na stosowanie grubszych warstw, równanie (4.3) jest modyfikowane współczynnikami korekcyjnymi uwzględniającymi wpływ danego czynnika na wartość mierzonych odkształceń, co można ogólnie zapisać w postaci:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^k = K_i \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^w \quad (4.10)$$

gdzie: K_i - i-ty współczynnik korekcyjny, określający ilościowy wpływ danego czynnika na mierzoną różnicę odkształceń

Na podstawie efektów optycznych uzyskanych podczas pomiarów techniką EWP, można bezpośrednio wyznaczyć różnicę odkształceń głównych $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sim N$ oraz kierunek odkształceń głównych α . W ogólnym przypadku, poszczególne składowe stanu odkształcenia są określane analitycznie lub doświadczalnie, co nosi nazwę *rozdzielania składowych stanu odkształcenia*.

Najprostszym przypadkiem analizy danych uzyskanych techniką EWP jest określenie wartości składowych stanu odkształcenia na krawędzi obszaru pokrytego warstwą wówczas, gdy krawędzie obiektu i warstwy są nieobciążone, tzn. σ_n i τ_s są równe zero. W takim przypadku:

$$\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0, \text{ a stąd } \varepsilon_1 \neq 0, \varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \quad (4.11)$$

a w rezultacie:

$$\varepsilon_1 = \frac{N \cdot f_\varepsilon}{2 \cdot t^w \cdot (1 + \nu_k)} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 = \frac{-\nu \cdot N \cdot f_\varepsilon}{2 \cdot t^w \cdot (1 + \nu_k)} \quad (4.13)$$

Ponieważ na krawędzi nie działają obciążenia styczne, to ε_1 jest skierowane stycznie do tej krawędzi, a ε_2 - prostopadle.

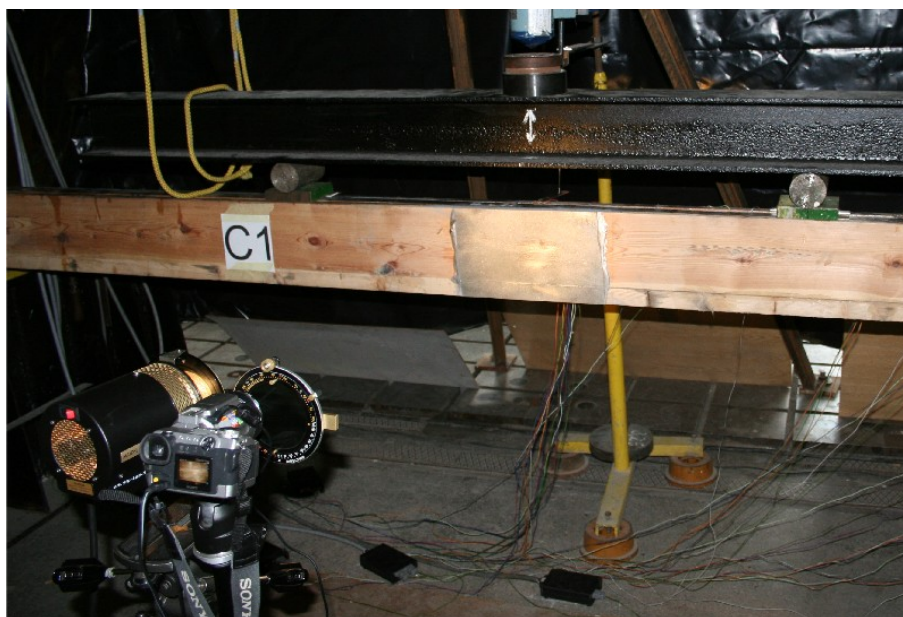
4.4.2. Opis modeli oraz stanowiska badawczego

Badania przeprowadzono na wybranych modelach belek drewnianych w skali technicznej z doklejoną w środku belki warstwą powierzchniową (wykonaną z żywicy epoksydowej Epidian 5 z dodatkiem ftalanu dwubutylnego, utwardzanej w temperaturze pokojowej utwardzaczem aminowym Z1) o wymiarach 220×400 mm. Grubość warstwy wynosiła $t^w = 1,9$ mm, a stała $f_c/2 \cdot t^w = 1,501 \cdot 10^{-3}$. Dla drewna przyjęto współczynnik Poissona $\nu = 0,42$ - rozdz. 6.3. Opis badanych modeli znajduje się w rozdz. 4.3. Stanowisko badawcze pokazano na rys. 4.150.

Warstwa została doklejona do badanej powierzchni klejem odblaskowym, sporządzonym na bazie tej samej kompozycji, z której wykonano płytkę, lecz z dodatkiem pyłu aluminiowego.

Pamiętając, że podstawowym założeniem TEWP jest przenoszenie odkształceń przez warstwę kleju tak, aby spełnione były równania (4.3), warstwa ta była możliwie cienka, a jej adhezja do powierzchni obiektu oraz warstwy bardzo dobra, co uzyskano poprzez dokładne oczyszczenie oraz odtłuszczenie powierzchni: drewna i warstwy, stykających się z klejem.

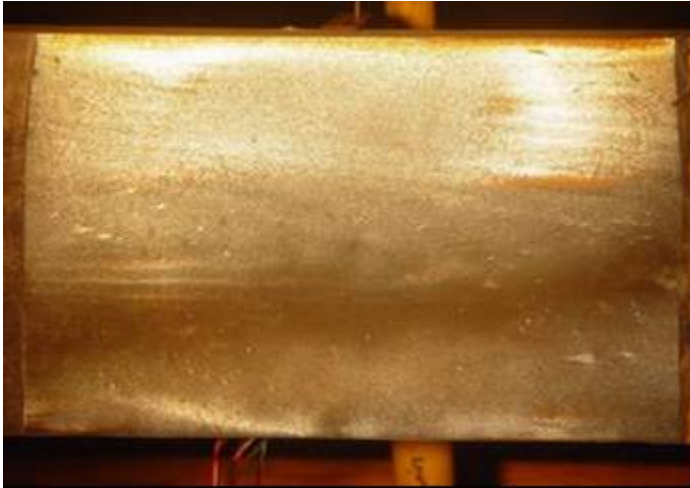
Aparatura pomiarowa (polaryskop) stosowany w badaniach w świetle odbitym, w tym techniką EWP, charakteryzuje się specyficzną cechą konstrukcyjną, tj. wszystkie zespoły optyczne (filtry polaryzacyjne, płytki fazowe) znajdują się z tej samej strony materiału dwójłomnego. W badaniach zastosowano polaryskop firmy Vishay typu V - model 031, którego konstrukcja umożliwia prowadzenie goniometrycznej kompensacji (pomiaru) rzędu izochromy, mocowanie kompensatora, aparatu fotograficznego, wymianę źródła światła na stroboskopowe. Widok zastosowanego polaryskopu pokazano na rys. 4.150.



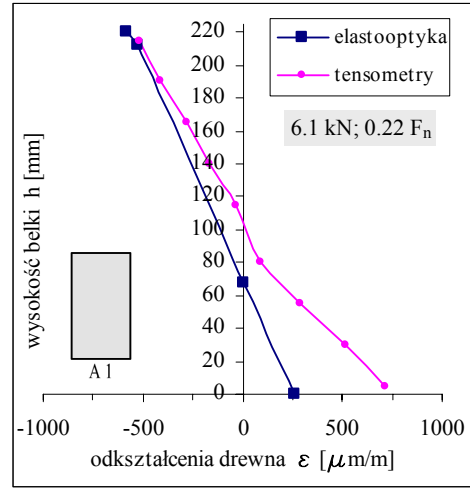
Rys. 4.150. Widok stanowiska do badań elastoptycznych

4.4.3. Wyniki badań elastoptycznych belki A1

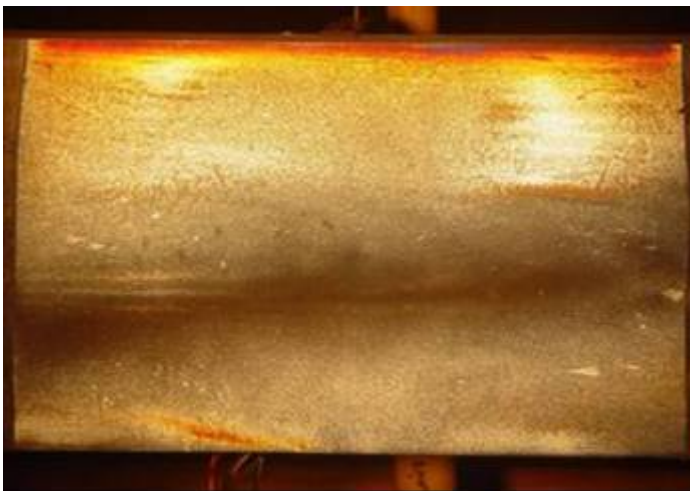
Powierzchnia badanego obszaru belki wykazuje charakterystyczny przebieg włókien dla rejonu w pobliżu rdzenia. Ponadto, w pobliżu dolnej krawędzi, widoczne jest rozwarstwienie włókien wypełnione żywicą. Brak sęków oraz skrętu włókien i znacznych uszkodzeń krawędzi belki. Szczelina przebiega poniżej osi geometrycznej belki, prawie poziomo, lekko wznosząc się od prawej strony pokazanego obszaru w górę.



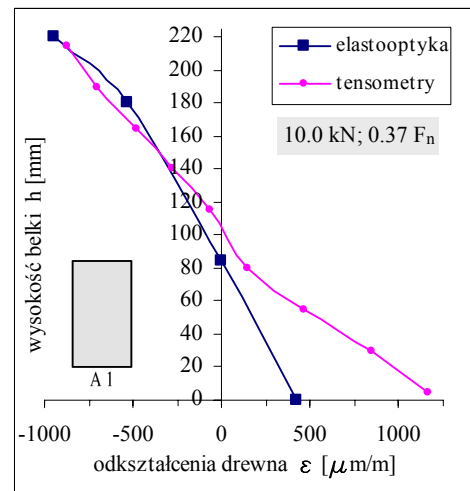
Rys. 4.151. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 6,1 \text{ kN}$)



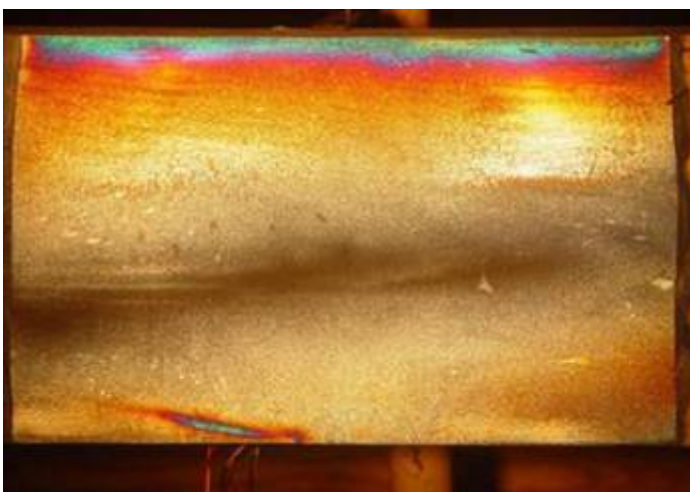
Rys. 4.152. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1
($F = 6,1 \text{ kN}$)



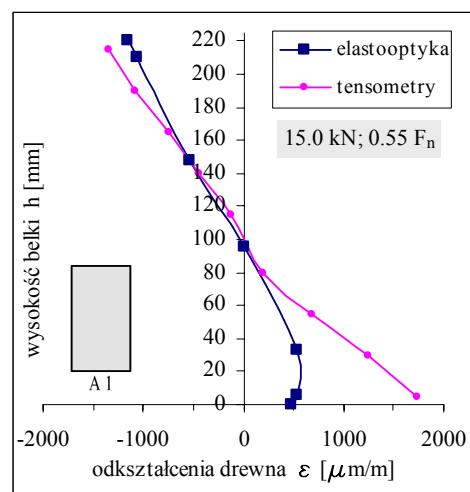
Rys. 4.153. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 10 \text{ kN}$)



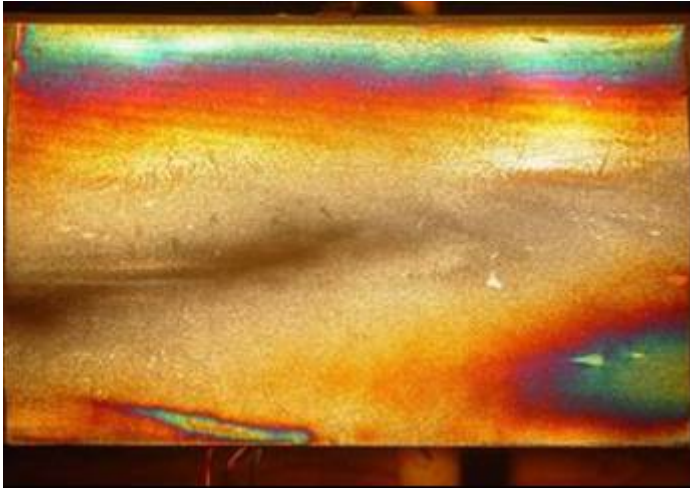
Rys. 4.154. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1
($F = 10 \text{ kN}$)



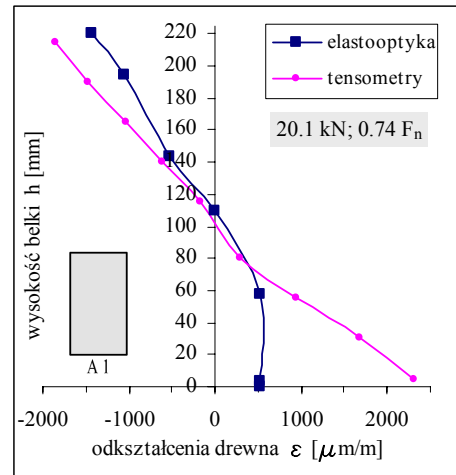
Rys. 4.155. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 15 \text{ kN}$)



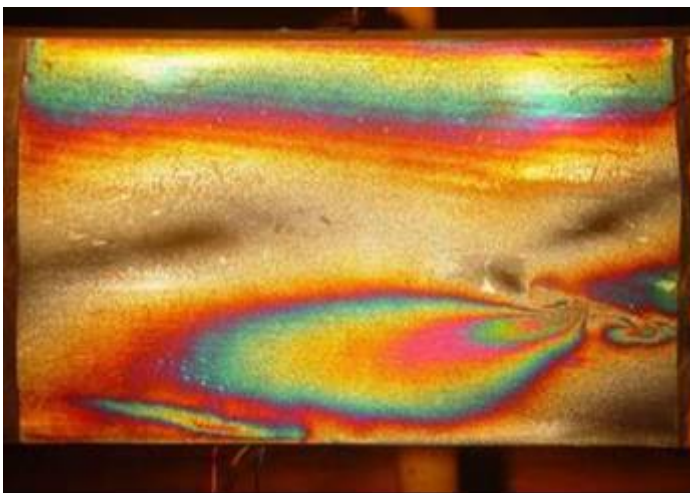
Rys. 4.156. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1
($F = 15 \text{ kN}$)



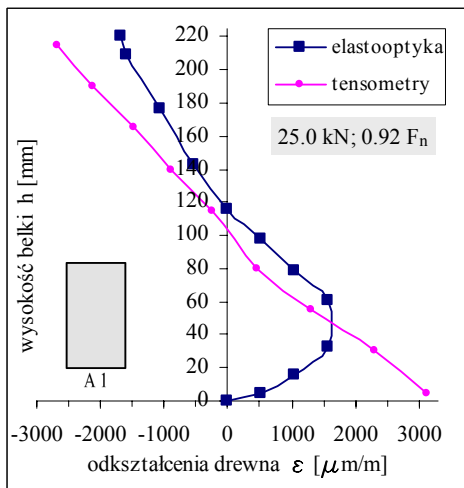
Rys. 4.157. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 20,1 \text{ kN}$)



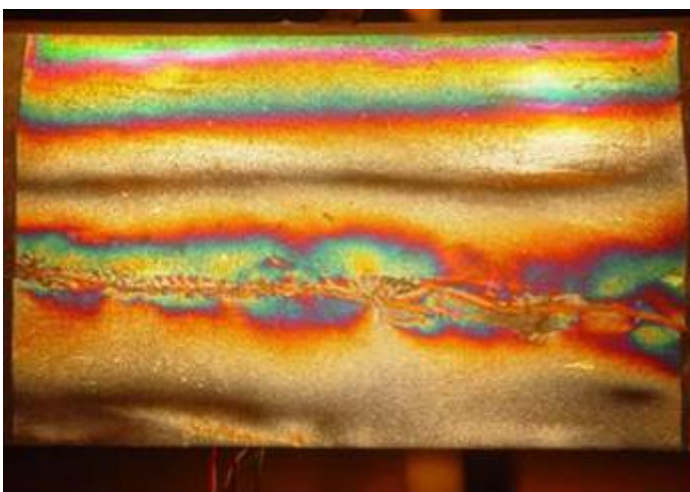
Rys. 4.158. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1
($F = 20,1 \text{ kN}$)



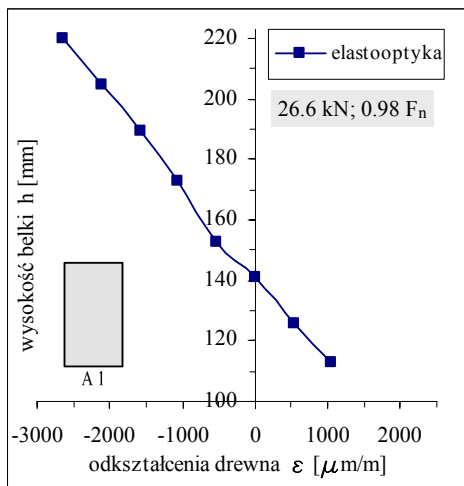
Rys. 4.159. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 25 \text{ kN}$)



Rys. 4.160. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka A1
($F = 25 \text{ kN}$)



Rys. 4.161. Obraz izochrom całkowitych - belka A1
($F = 26,6 \text{ kN}$)



Rys. 4.162. Odształcenia drewna w przekroju zginanym powyżej szczeliny, belka A1
($F = 26,6 \text{ kN}$)

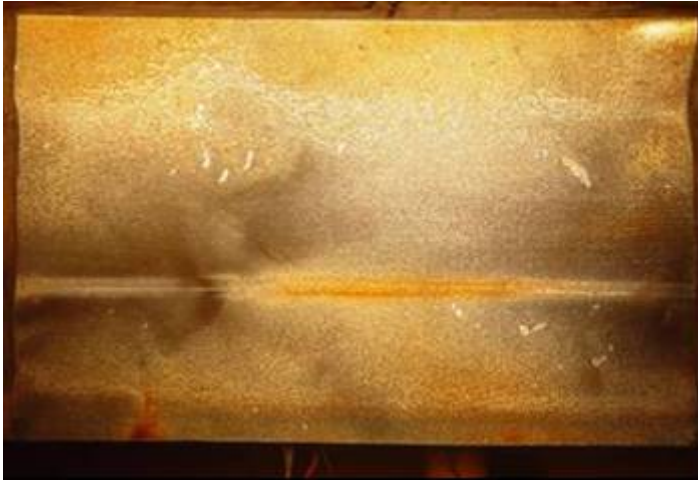
Analiza obrazów izochrom oraz uzyskanych na ich podstawie wykresów $\varepsilon_x(h)$ wykazała, że:

- początkowo liniowy charakter przebiegu $\varepsilon(h)$ (dla małych wartości obciążeń) ulega zmianie, przy czym wyraźnie zmienia się położenie punktu zmiany znaku tego odkształcenia w przekroju - początkowo znajduje się on w odległości $0.7h$ od górnej krawędzi belki, by ostatecznie przemieścić się do punku położonego w odległości ok. $0.47h$ w początkowej fazie zniszczenia (szczelina propaguje od prawej strony badanego obszaru ku lewej), i $0.36h$ po osiągnięciu maksymalnej wartości obciążenia (szczelina przebiega przez cały badany obszar),
- od obciążenia równego 15 kN zaznacza się zarówno wyraźnie nieliniowy przebieg odkształcenia $\varepsilon(h)$ w strefie rozciąganej, jak i spadek wartości tego odkształcenia na krawędzi belki; stan ten należy wiązać z postępującym (poza obszarem pokrytym warstwą powierzchniową) procesem propagacji szczeliny, prawdopodobnie z obszaru przypodporowego, co powoduje odciążenie skrajnych włókien belki w strefie rozciąganej; w szczególności potwierdza to obraz izochrom dla obciążenia 25 kN,
- rozwój szczeliny spowodował przejście obciążenia przez górną część przekroju belki i istotny wzrost wartości $\varepsilon(h)$ na jej górnej krawędzi (w porównaniu z początkową fazą propagacji szczeliny przez badany obszar), przy czym rozkład tego odkształcenia powtórnie przybrał praktycznie liniowy charakter,
- przy obciążeniu siłą $F = 15$ kN zaobserwowano malejące odkształcenia przekroju $\varepsilon(h)$ w strefie rozciąganej. Dla obciążenia 25 kN na krawędzi rozciąganej osiągają wartość równą 0 co wskazuje na zerwanie włókien drewna od strony doklejonej warstwy.

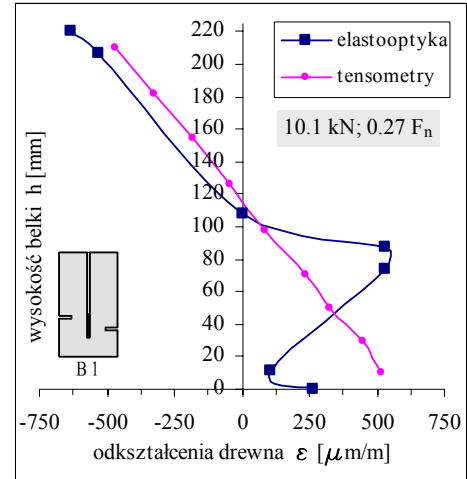
4.4.4. Wyniki badań elastooptycznych belki B1



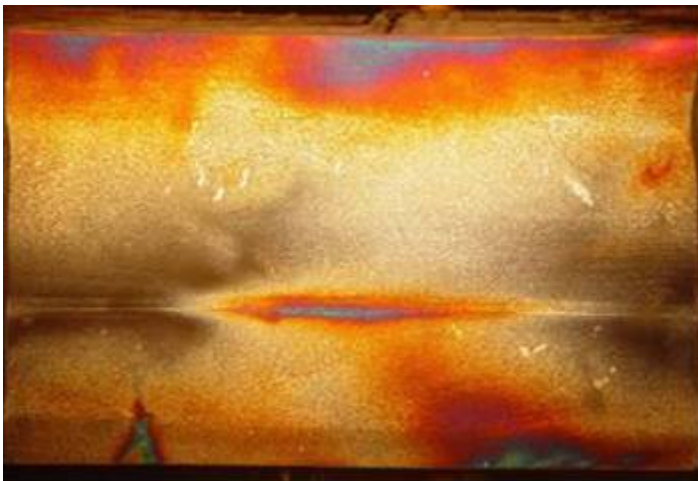
Rys. 4.163. Widok powierzchni belki B1 - po próbie



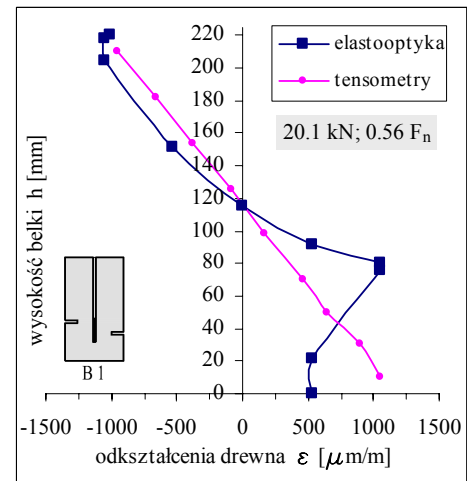
Rys. 4.164. Obraz izochrom całkowitych - belka B1
($F = 10,1 \text{ kN}$)



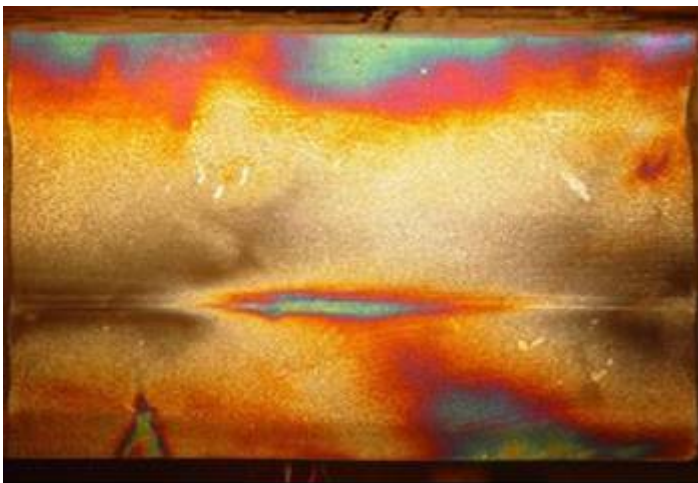
Rys. 4.165. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1
($F = 10,1 \text{ kN}$)



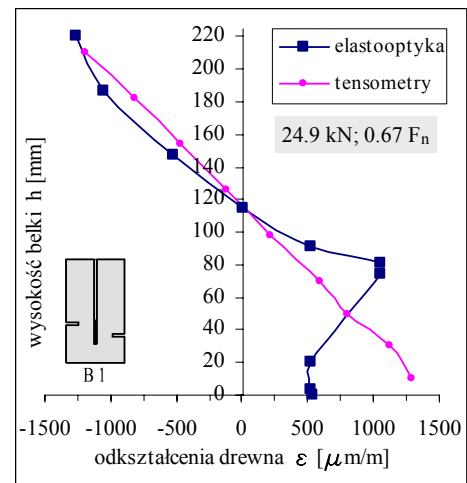
Rys. 4.166. Obraz izochrom całkowitych - belka B1
($F = 20,1 \text{ kN}$)



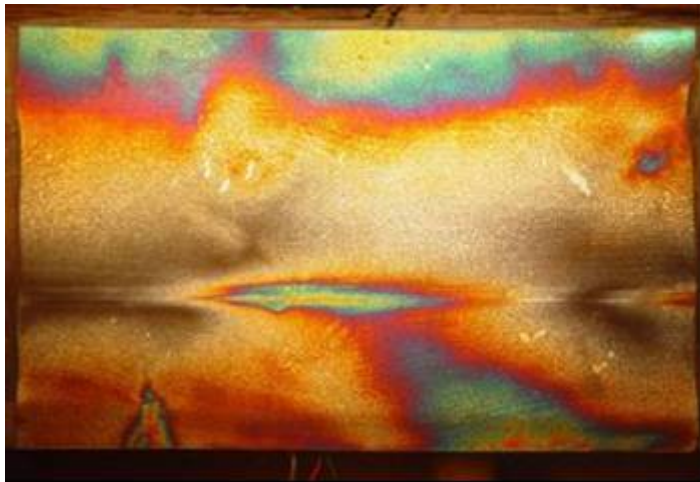
Rys. 4.167. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1
($F = 20,1 \text{ kN}$)



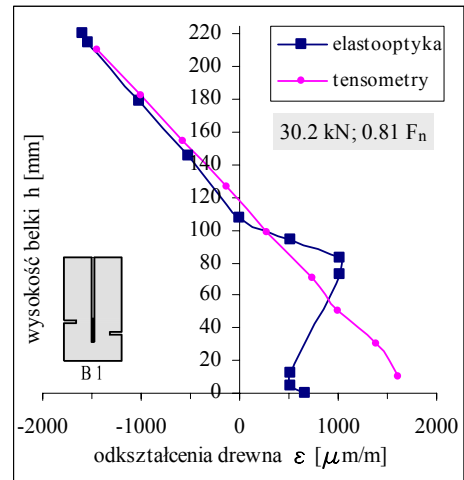
Rys. 4.168. Obraz izochrom całkowitych - belka B1
($F = 24,9 \text{ kN}$)



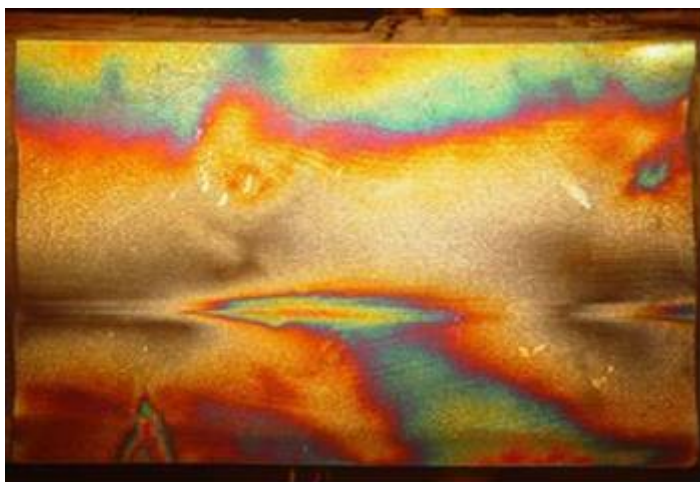
Rys. 4.169. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1
($F = 24,9 \text{ kN}$)



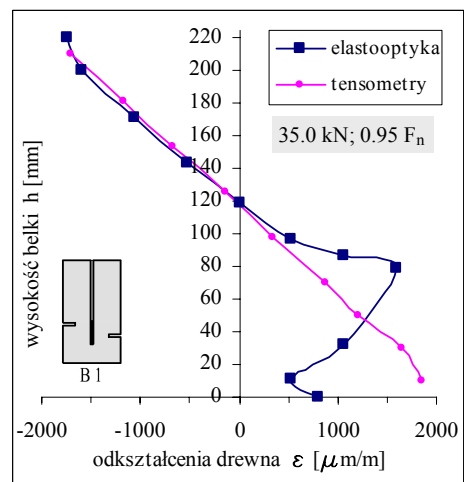
Rys. 4.170. Obraz izochrom całkowitych - belka B1 ($F = 30,2 \text{ kN}$)



Rys. 4.171. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1 ($F = 30,2 \text{ kN}$)



Rys. 4.172. Obraz izochrom całkowitych - belka B1 ($F = 35 \text{ kN}$)



Rys. 4.173. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka B1 ($F = 35 \text{ kN}$)

Analiza powyższych obrazów izochrom i wykresów odkształcenia $\epsilon(h)$ w belce B1 wykazuje, że:

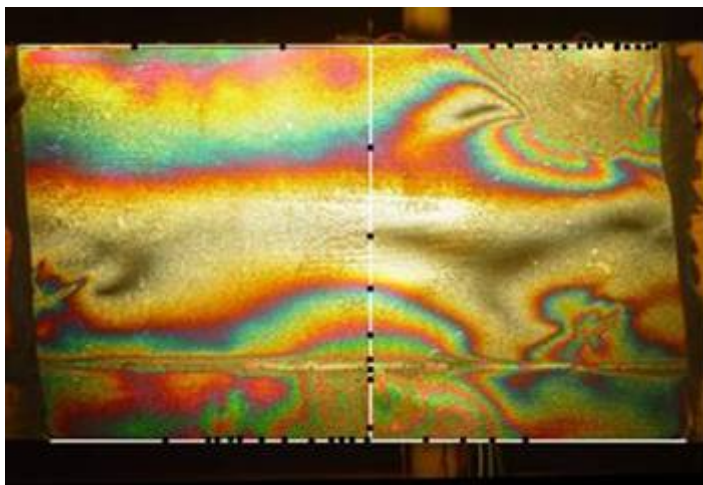
- obserwowany w całym zakresie obciążeń nieliniowy charakter przebiegu $\epsilon(h)$ ma związek ze strukturą belki w rejonie przyklejenia warstwy powierzchniowej, w szczególności zaznacza się oddziaływanie poziomego nacięcia belki (wykonanego w odległości 80 mm od dolnej krawędzi belki), któremu na wykresach $\epsilon(h)$ odpowiada „pik”; należy przy tym zwrócić uwagę, że w środkowej części badanego obszaru widoczny jest sęk oraz skręt włókien wokół niego (rys. 4.163), co jest prawdopodobnie przyczyną występowania wzrostu odkształceń w rozciąganej strefie belki w pobliżu analizowanego przekroju i charakterystycznego skośnego obrazu izochrom w tym rejonie,
- przyrost odkształceń w skrajnych włóknach strefy rozciąganej jest nierównomierny i może być spowodowany oddziaływaniem zarówno struktury drewna w tym rejonie, jak i wpływem nacięcia,
- wartości odkształceń $\epsilon(h)$, odpowiadające położeniu tensometrów „0” i „8”, podano w poniższej tabeli:

Tab. 4.23. Porównanie wartości odkształceń drewna w belce B1 ($F = 35 \text{ kN}$)

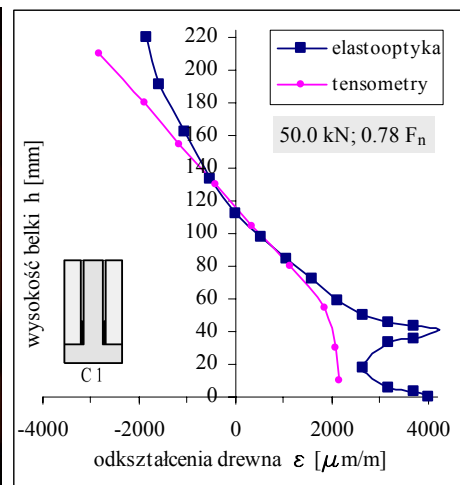
nr tensometru	wysokość na przekroju h [mm]	odkształcenie (tensometry) ε_{tens} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	odkształcenie (elastoptyka) ε_{elast} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
8	10	-1707	-1670
0	210	1860	510

Wartości odkształceń w strefie ściskanej różnią się nieznacznie (o ok. 2%), podczas gdy w strefie rozciąganej różnica jest zasadnicza (przeszło 3,5-krotna).

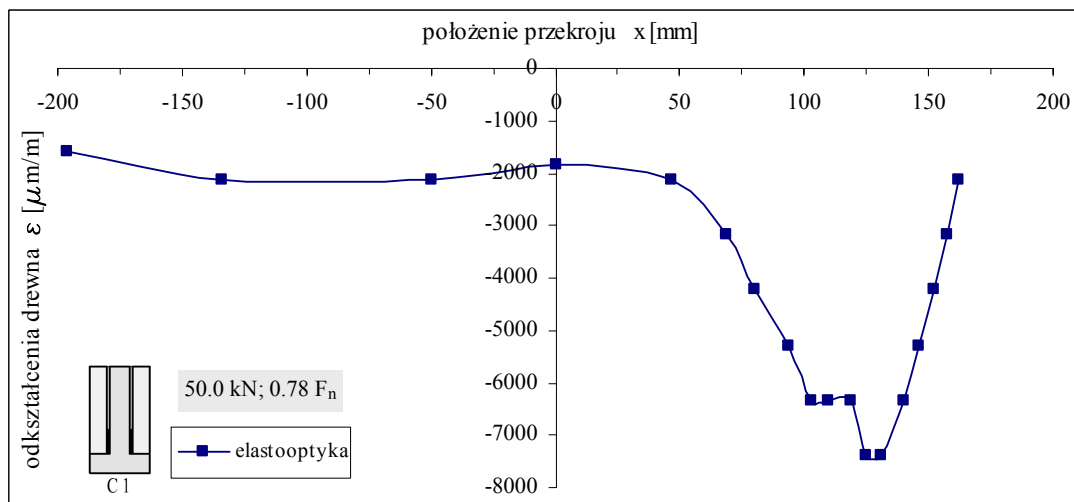
4.4.5. Wyniki badań elastoptycznych belki C1



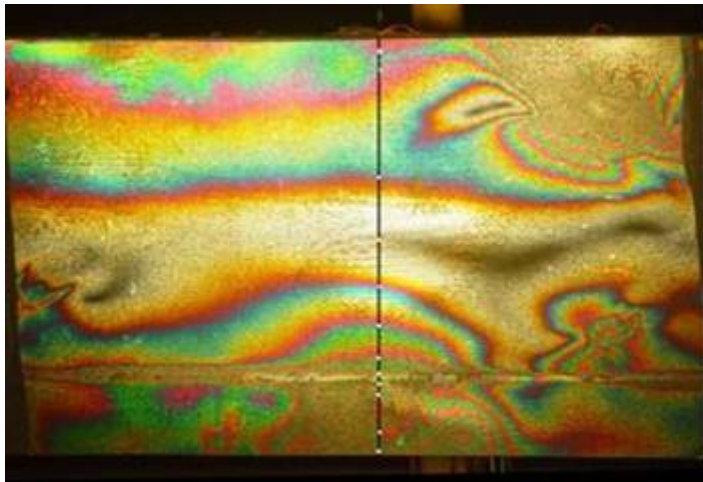
Rys. 4.173. Obraz izochrom całkowitych - belka C1 ($F = 50 \text{ kN}$)



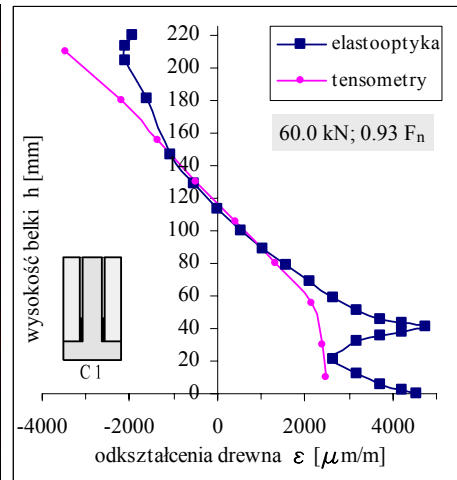
Rys. 4.174. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka C1 ($F = 50 \text{ kN}$)



Rys. 4.175. Rozkład odkształceń na górnej krawędzi - belka C1 ($F = 50 \text{ kN}$)



Rys. 4.176. Obraz izochrom całkowitych - belka C1
($F = 60 \text{ kN}$)



Rys. 4.177. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka C1
($F = 60 \text{ kN}$)

Analiza powyższych obrazów izochrom i wykresów odkształcenia $\varepsilon(h)$ w belce C1 pozwala sformułować następujące wnioski:

- przebieg krzywych $\varepsilon(h)$ jest nieliniowy z charakterystycznym „pikiem” na wysokości 40 mm od dolnej krawędzi belki i odpowiada dokładnie miejscu występowania spoiny pomiędzy belką i nakładką. Zmiana znaku odkształcenia występuje na wysokości ok. 115 mm od dolnej krawędzi belki,
- porównując charakter krzywych z pomiarów: elastooptycznego i tensometrycznego widać, że w pierwszym przypadku krzywe dla kolejnych poziomów obciążenia zachowują swój charakter i „odzworowują” miejsca koncentracji odkształceń związane ze strukturą powierzchni belki pokrytej warstwą. Świadczą o tym obrazy izochrom, na których np. sęki, są „widoczne” w formie charakterystycznych pętli izochrom o wyższych rzędach. W szczególności sęk w strefie ściskanej generuje bardzo wysoki rząd izochromy ($N > 8$),
- przebieg krzywych naprężenia normalnego, obliczonego na podstawie pomiarów tensometrycznych, nie wykazuje ścisłego związku ze strukturą powierzchni belki, co może wiązać się zarówno z efektem uśredniania wskazań tensometru na długości bazy pomiarowej, jak i quasipunktowym charakterem pomiaru (przykładowo, tensometry przyklejono obok spoiny łączącej nakładkę z belką). Jeśli przyjąć, że tensometry „0” i „8” dostarczyły informacji o wartości odkształcenia normalnego $\varepsilon(h)$ na krawędziach belki, to porównanie z wartościami $\varepsilon(h)$ obliczonymi na podstawie obrazu izochrom pozwala stwierdzić, że różnice tych odkształceń w strefie ściskanej i w strefie rozciąganej są duże - ok. 63% różnicy, przy czym mniejsze w strefie rozciąganej ok. 33 %, (tab. 4.24),
- w środkowej części belki wskazania tensometrów oraz odkształcenia obliczone na podstawie obrazu izochrom są prawie identyczne, wysokość położenia osi obojętnej położenie osi obojętnej jest taka sama,
- zaburzenie przebiegu odkształceń, które pojawia się na wysokości 40 mm od dolnej krawędzi belki powstało na skutek pojawienia się naprężeń stycznych między belką i nakładką,
- znaczny wzrost wartości odkształcenia w rejonie dolnej krawędzi belki wiąże się z oddziaływaniem sęka (widocznego na zdjęciu powierzchni - praktycznie na osi analizowanego przekroju),

- analiza wykresu $\varepsilon(x)$ potwierdza (widoczny na obrazach izochrom) wpływ sęka, położonego w pobliżu górnej krawędzi belki, na lokalne spiętrzenie odkształceń.

Tab. 4.24. Porównanie wartości odkształceń drewna w belce C1 ($F = 60$ kN)

nr tensometru	wysokość na przekroju h [mm]	odkształcenie (tensometry) ε_{tens} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	odkształcenie (elastoptyka) ε_{elast} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
8	10	-3451	-2110
0	210	2481	3300



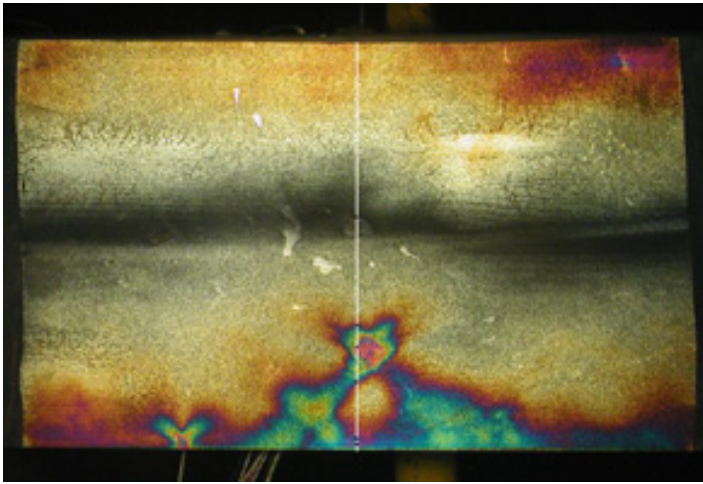
Rys. 4.178. Widok powierzchni belki przed doklejeniem warstwy powierzchniowej - belka C1

4.4.6. Wyniki badań elastoptycznych belki D1

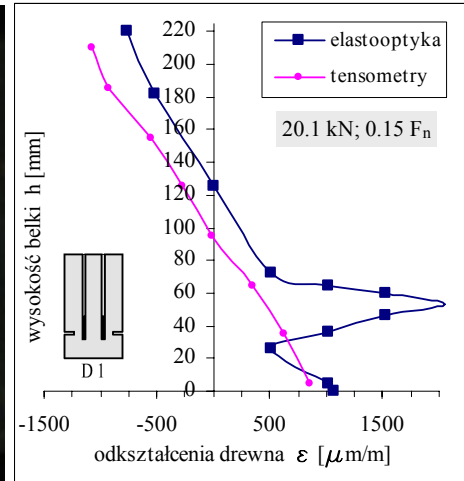
Widok powierzchni belki D1 przed naklejeniem warstwy powierzchniowej pokazano na rys. 4.179. Na rys. 4.179 wyraźne widoczne są ślady po gwoździach oraz sęk w środku rozpiętości belki, w strefie rozciąganej.



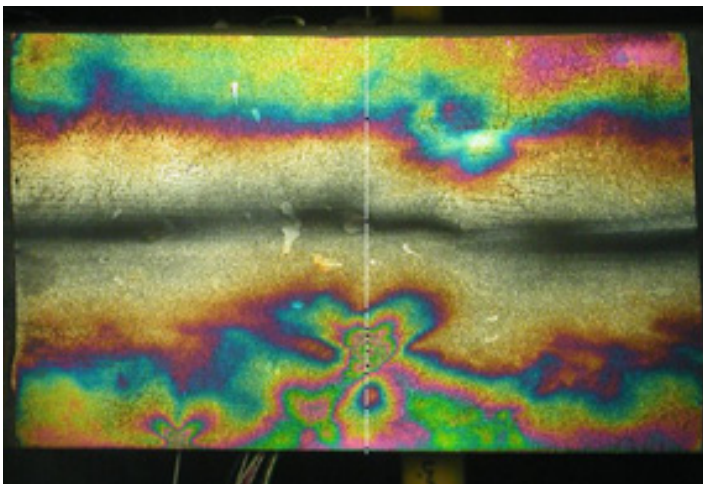
Rys. 4.179. Widok powierzchni belki przed doklejeniem warstwy powierzchniowej - belka D1



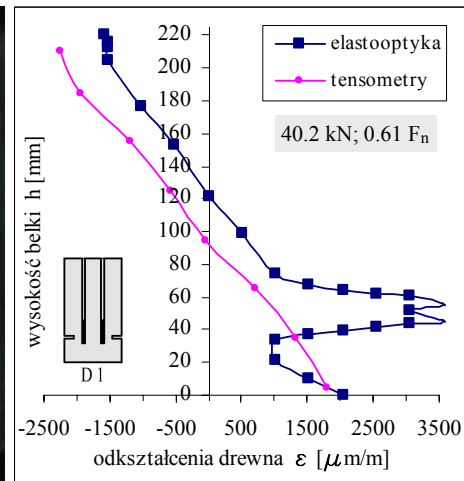
Rys. 4.180. Obraz izochrom całkowitych - belka D1 ($F = 20,1 \text{ kN}$)



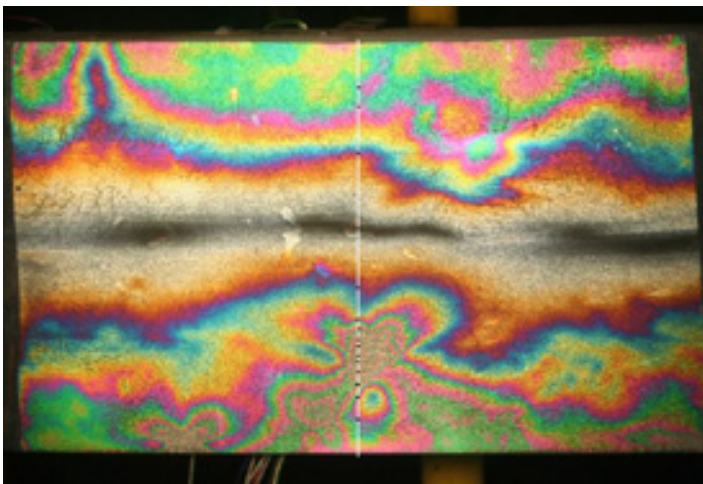
Rys. 4.181. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D1 ($F = 20,1 \text{ kN}$)



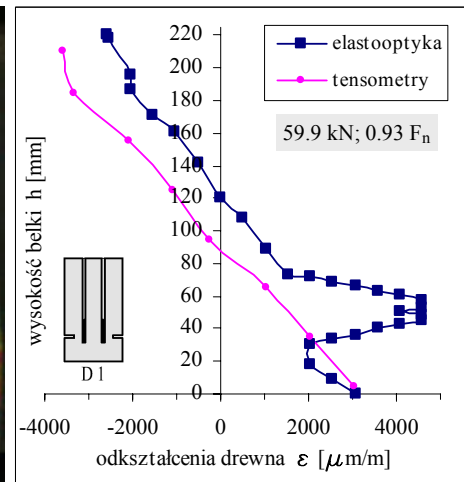
Rys. 4.182. Obraz izochrom całkowitych - belka D1 ($F = 40,2 \text{ kN}$)



Rys. 4.183. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D1 ($F = 40,2 \text{ kN}$)



Rys. 4.184. Obraz izochrom całkowitych - belka D1 ($F = 59,9 \text{ kN}$)



Rys. 4.185. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka D1 ($F = 59,9 \text{ kN}$)

Analiza powyższych obrazów izochrom i wykresów odkształcenia $\varepsilon(h)$ w belce D1 pozwala sformułować następujące wnioski:

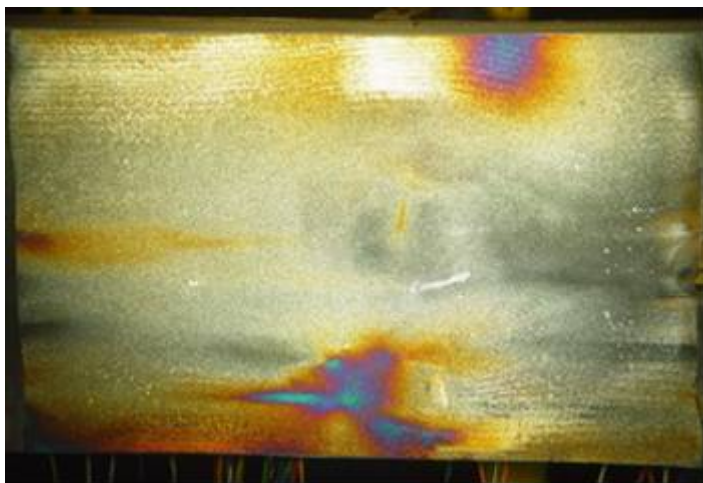
- przebieg krzywych $\varepsilon(h)$ jest nieliniowy z charakterystycznym „pikiem” na wysokości 40-60 mm od dolnej krawędzi belki i odpowiada miejscu występowania sęka. Zmiana znaku odkształcenia występuje na wysokości ok. 120 mm od dolnej krawędzi belki,
- widoczny jest wyraźny wpływ miejsca po gwoździu na dolnej krawędzi belki gdzie występuje lokalna koncentracja odkształceń - rys. 4.179,
- wartości odkształcenia $\varepsilon(h)$ w punktach odpowiadających położeniu tensometrów „0” i „7”, przy obc. 60 kN, zamieszczono w tab. 4.25. Różnica wartości $\varepsilon(h)$ w miejscu przyklejenia tensometru „0” jest niewielka i wynosi ok. 9%, zaś w strefie ściskanej - w punkcie „7” - różnica ta wynosi ok. 36%.

Tab. 4.25. Porównanie wartości odkształceń drewna w belce D1 ($F = 60$ kN)

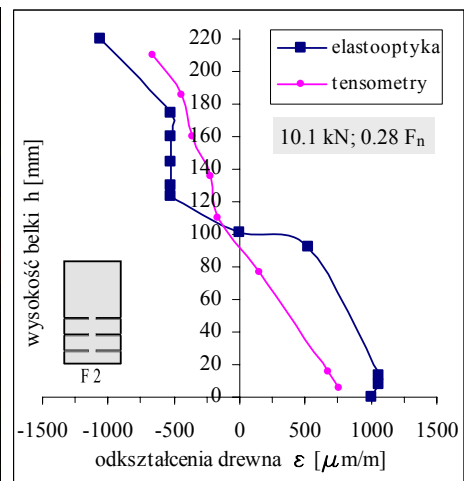
nr tensometru	wysokość na przekroju h [mm]	odkształcenie (tensometry) ε_{tens} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	odkształcenie (elastoptyka) ε_{elast} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
7	5	-3591	-2300
0	210	3031	2780

4.4.7. Wyniki badań elastoptycznych belki F2

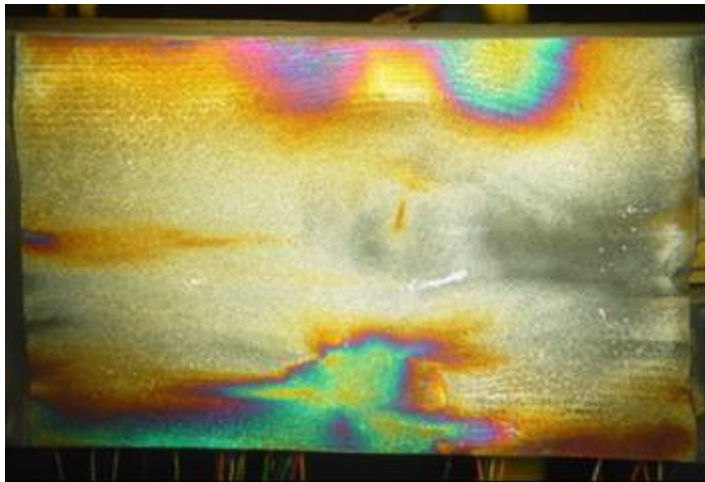
Na rys. 4.196 widoczne: sęk, poniżej otwór oraz szczeliny z wklejonymi taśmami, naturalne splekania i charakterystyczny przebieg włókien wokół sęka.



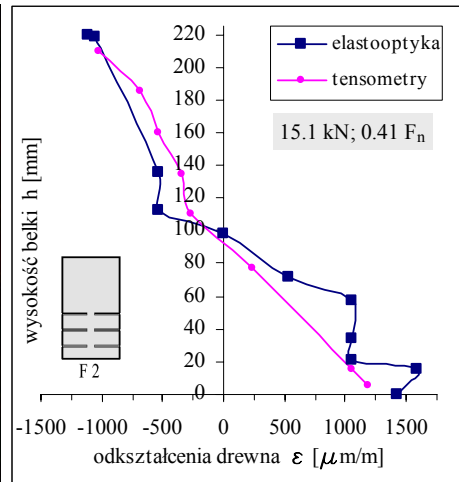
Rys. 4.186. Obraz izochrom całkowitych - belka F2 ($F = 10,1$ kN)



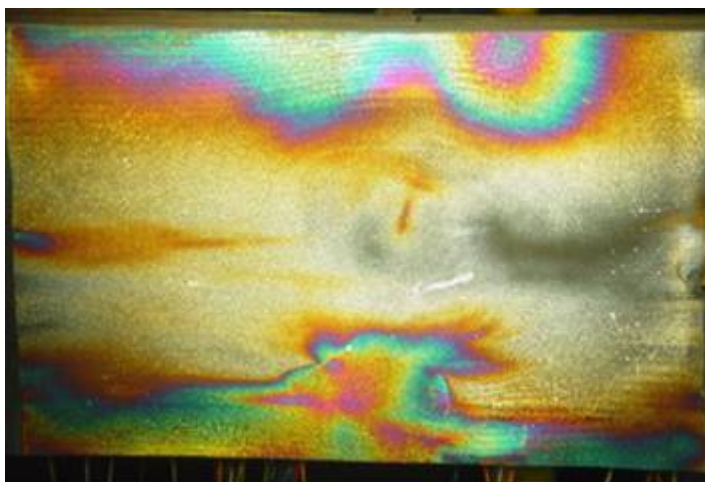
Rys. 4.187. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2 ($F = 10,1$ kN)



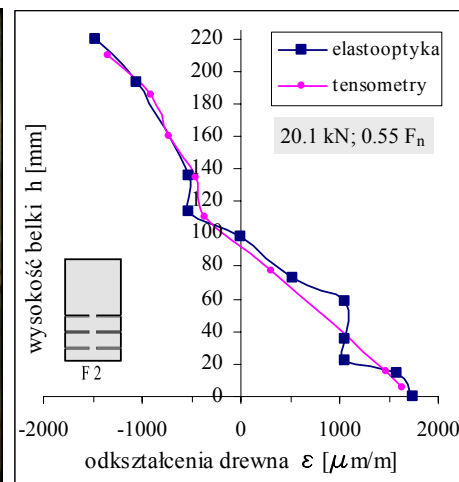
Rys. 4.188. Obraz izochrom całkowitych - belka F2
($F = 15,1 \text{ kN}$)



Rys. 4.189. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2
($F = 15,1 \text{ kN}$)



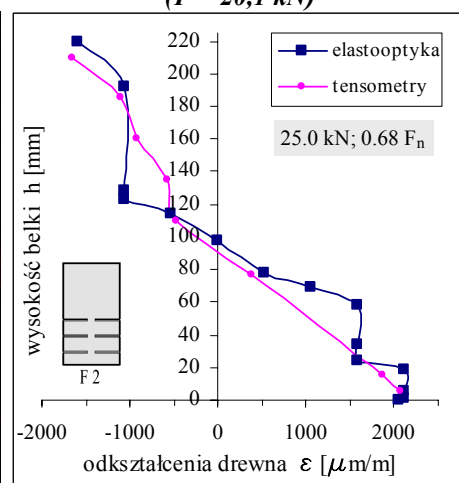
Rys. 4.190. Obraz izochrom całkowitych - belka F2
($F = 20,1 \text{ kN}$)



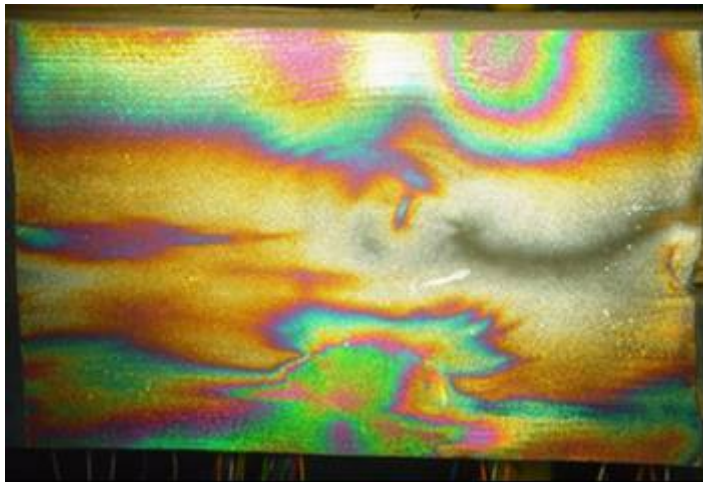
Rys. 4.191. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2
($F = 20,1 \text{ kN}$)



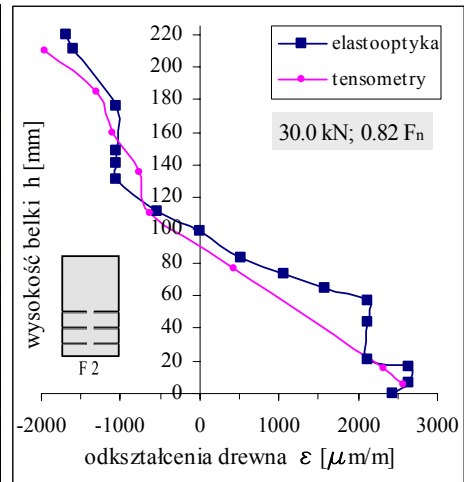
Rys. 4.192. Obraz izochrom całkowitych - belka F2
($F = 25 \text{ kN}$)



Rys. 4.193. Odkształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2
($F = 25 \text{ kN}$)



Rys. 4.194. Obraz izochrom całkowitych - belka F2 (F = 30 kN)



Rys. 4.195. Odształcenia drewna w przekroju zginanym - belka F2 (F = 30 kN)

Analiza powyższych obrazów izochrom i rozkładów odkształcenia $\varepsilon(h)$ w belce F2 wykazała, że:

- w całym zakresie obciążenia belki rozkład $\varepsilon(h)$ w analizowanym przekroju jest nieliniowy, przy czym „zaburzenia” przebiegu $\varepsilon(h)$ narastają wraz ze wzrostem obciążenia i mają ścisły związek ze strukturą badanej powierzchni,
- zmiana znaku odkształcenia $\varepsilon(h)$ następuje w odległości ok. 95 mm od dolnej krawędzi belki i jedynie nieznacznie punkt ten zmienia swoje położenie podczas narastania obciążenia,
- wpływ otworu na rozkład odkształceń w strefie rozciąganej jest wyraźnie widoczny, podczas gdy sęk leżący na wysokości teoretycznej osi obojętnej belki, generuje mniejszy gradient odkształceń,
- zmiany wartości $\varepsilon(h)$ w skrajnych włóknach strefy rozciąganej wskazują na oddziaływanie najniższej położonej taśmy - początkowo wartości $\varepsilon(h)$ rosną, po czym od obciążenia 25,0 kN maleją, co ma prawdopodobnie związek z interferencją pól odkształceń wywołanych przez otwór położony powyżej, oddziaływanie taśmy oraz zginanie belki; po osiągnięciu wartości siły niszczącej (36,49 kN) zaobserwowano odspojenie taśmy od drewna,
- wartości odkształcenia $\varepsilon(h)$ w punktach odpowiadających położeniu tensometrów „0” i „7”, przy obc. 30 kN, podano w tab. 4.26. Różnica wartości $\varepsilon(h)$ w miejscu przyklejenia tensometru „0” jest znikoma i wynosi ok. 1%, zaś w strefie ściskanej - w punkcie „7” - różnica wynosi ok. 24%.

Tab. 4.26. Porównanie wartości odkształceń drewna w belce F2 (F = 30 kN)

nr tensometru	wysokość na przekroju h [mm]	odkształcenie (tensometry) ε_{tens} [μm/m]	odkształcenie (elastoptyka) ε_{elast} [μm/m]
7	10	-1954	-1580
0	210	2571	2640



Rys. 4.196. Widok powierzchni belki F2 przed przyklejeniem warstwy powierzchniowej,

4.4.8. Wnioski ogólne z przeprowadzonych badań elastooptycznych

Na podstawie wyników opisanych badań i sformułowanych powyżej wniosków szczegółowych stwierdzić można, że elastooptyka dobrze odwzorowuje strukturę drewna - występujące często w drewnie spękania, wady drewna, miejsca po gwoździach, ewentualnie miejsca występowania łączników (kołków drewnianych, śrub, gwoździ, itd.)

Dzięki doklejeniu warstwy w miejscach nieciągłości przekroju (nacięć) zaobserwowano zaburzenia przebiegów wykresu odkształceń na skutek pojawiających się naprężeń stycznych, czego nie sposób uzyskać opierając się jedynie na metodzie pomiaru tensometrami elektrooporowymi. Pomiar ten ma bowiem charakter quasi-punktowy.

Różnice pomiędzy wartościami odkształceń uzyskanymi z tensometrów i metody elastooptycznej można tłumaczyć różnicami struktury dwóch przeciwległych powierzchni bocznych belek - różne przebiegi włókien drewna, koncentracja włókien, spękania struktury, występujące inkluzje (sęki). Nie sposób uzyskać drewnianej belki o wymiarach przekroju jak w badaniach (120×220 mm) o idealnie równoległym przebiegu włókien z dwu stron.

Warstwa powierzchniowa nie wzmocniła konstrukcji (belki). Przebieg pęknięć w każdym przypadku był taki sam w warstwie jak w badanej belce.

Potrzebny jest program badawczy zastosowania warstwy do analizy ilościowej odkształceń w konstrukcjach drewnianych. Większa próba pozwalałaby stwierdzić jaka występuje zgodność pomiędzy odkształceniami uzyskanymi z pomiarów tensometrycznych oraz uzyskanymi na podstawie metody elastooptycznej.

Program badawczy należałoby ukierunkować na badanie wpływu nieciągłości struktury litych przekrojów drewnianych na deformacje i nośność przekroju. Metodą EWP można byłoby ustalić przy jakiej wielkości spękań drewna następuje brak współpracy pomiędzy rozsegregowanymi się partiami przekroju.

Analizując uzyskane wyniki wydaje się, iż przy zastosowaniu warstwy elastooptycznej doklejanej do całej długości belki możliwe byłoby również określenie jakościowe wpływu odległości „zatapianej” wkładki wzmocniającej od powierzchni bocznych belek na rozkład odkształceń i postać zniszczenia przekroju zespolonego co dałoby podstawę do optymalnego lokowania wkładek w przekroju.

5. MODEL ANALITYCZNY

5.1. PRZEKRÓJ ZASTĘPCZY BELKI WZMOCNIONEJ

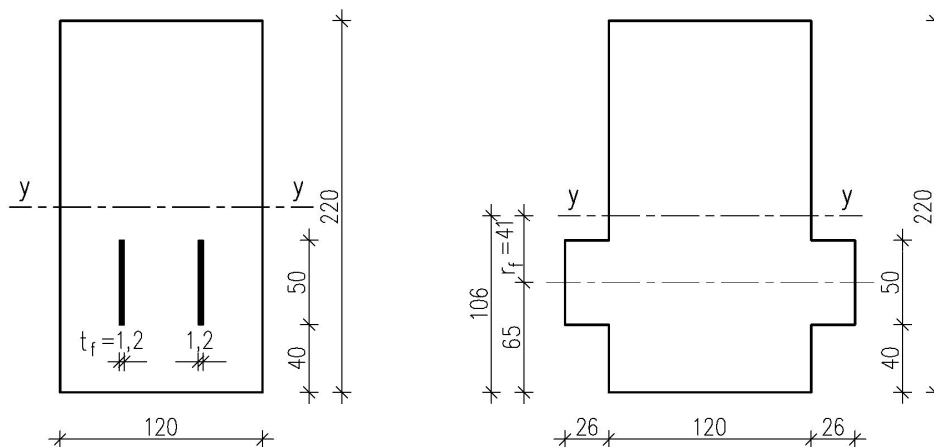
W modelu zastępczych charakterystyk przekroju (rozd. 3.5.2) wzmocnienie jest uwzględnione poprzez ideowe zwiększenie wymiarów geometrycznych przekroju poprzecznego belki drewnianej.

Przystępując do analizy należy zwrócić uwagę na to, że drewno, podobnie jak wszelkie materiały drewnopochodne, przejawia własności nie tylko sprężyste ale i plastyczne oraz lepkosprężyste. W belkach dwumateriałowych na skutek odmiennych własności reologicznych użytych materiałów może dochodzić do redystrybucji naprężeń w przekroju, [180]. Przy wyznaczaniu zastępczych charakterystyk wykorzystuje się jedynie znajomość własności sprężystych materiałów. Poniżej przedstawiono prostą analizę teoretyczną, weryfikując przy jej pomocy wyniki badań uzyskane dla belek serii C. Zastępcza szerokość b_d drewna przypadająca na jedną taśmę:

$$b_d = t_f \cdot \frac{E_f}{E_d} \quad (5.1)$$

Dla belki C:

$$b_d = 1,2 \text{ mm} \cdot \frac{165 \text{ GPa}}{7,6 \text{ GPa}} = 26 \text{ mm}$$



Rys. 5.1. Przekrój zastępczy belki C

Moment bezwładności przekroju litego:

$$I_y = 10648 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Moment bezwładności przekroju zastępczego:

$$I_{y,zast} = 11181 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Zakłada się, że odkształcenia w drewnie i taśmie są jednakowe (w przybliżeniu). Stąd:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon \\ \sigma_d = E_d \cdot \varepsilon \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\sigma_f}{\sigma_d} = \frac{E_f}{E_d} \quad (5.2)$$

Naprężenie w taśmie przeliczone na naprężenie w drewnianym przekroju zastępczym:

$$\sigma_{d,zast} = \sigma_f \cdot \frac{E_d}{E_w} \quad (5.3)$$

Moment zginający (belka obciążona jak na rys 5.2):

$$M = \frac{F \cdot l}{6} \quad (5.4)$$

Naprężenie w przekroju zastępczym:

$$\sigma_{zast} = \frac{M \cdot r_f}{I_{zast}} \quad (5.5)$$

Charakterystyka sztywności belki:

$$F = k \cdot u \Rightarrow k = \frac{F}{u} \quad (5.6)$$

Dla belki zastępczej:

$$k_{obl} = \frac{F}{u} = \frac{1296}{23} \cdot \frac{E_d \cdot I_{y,zast}}{l^3} \quad (5.7)$$

Dla belki C:

$$k_{obl} = \frac{1296}{23} \cdot \frac{E_d \cdot I_{y,zast}}{l^3} = \frac{1296}{23} \cdot \frac{0,76 \cdot 11181 \cdot 10^4}{3800^3} = 0,87 N/mm$$

Tab. 5.1. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka C1

Siła F [kN]	Napręż. normal. w drewnie (badania) σ_d [MPa]	Napręż. normal. w taśmie (badania) σ_f [MPa]	Napręż. normal. zastępcze $\sigma_{d,zast}$ [MPa]	Procentowa różnica naprężeń $\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	Ugięcie (badania) u [mm]	Współcz. sztywn. k [kN/mm]	Procentowa różnica sztywności k / k_{obl} [%]
10,13	1,929	42,50	1,958	1,5	9,37	1,08	19,9
20,11	4,104	88,87	4,093	0,3	19,80	1,02	14,8
30,15	6,360	136,75	6,299	1,0	29,68	1,02	14,8
40,07	9,427	184,80	8,512	9,7	40,07	1,00	13,4
50,05	11,944	236,04	10,872	9,0	51,17	0,98	11,5
60,01	13,891	298,48	13,748	1,0	63,26	0,95	8,7

Tab. 5.2. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka C2

Siła F [kN]	Napręż. normal. w drewnie (badania) σ_d [MPa]	Napręż. normal. w taśmie (badania) σ_f [MPa]	Napręż. normal. zastępcze $\sigma_{d,zast}$ [MPa]	Procentowa różnica naprężeń $\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	Ugięcie (badania) u [mm]	Współcz. sztywn. k [kN/mm]	Procentowa różnica sztywności k / k_{obl} [%]
9,98	1,865	43,09	1,985	-6,4	9,59	1,04	16,8
20,06	3,905	90,72	4,179	-7,0	20,09	1,00	13,3
30,00	6,239	134,69	6,204	0,6	33,05	0,91	4,6
40,00	8,675	181,46	8,358	3,7	47,4	0,84	-2,6
44,92	10,086	204,88	9,437	6,4	58,68	0,77	-13,1

Tab. 5.3. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka C3

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
10,00	1,852	41,16	1,896	-2,4	10,68	0,94	7,5
20,18	3,632	95,59	4,403	-21,2	24,15	0,84	-3,6
30,00	5,317	150,36	6,926	-30,3	36,96	0,81	-6,7
35,09	6,203	178,25	8,210	-32,4	42,79	0,82	-5,6
39,97	7,010	209,66	9,657	-37,8	49,14	0,81	-6,4

W tab. 5.1 - 5.3 dla belki przedstawiono wyniki analizy dla modelu C naprężeń w drewnie (na wysokości środka ciężkości zbrojenia - 65 mm od spodu belki) i naprężeń w taśmie przeliczonych na drewniany przekrój zastępczy oraz charakterystyki sztywności uzyskane w badaniach i na podstawie charakterystyk zastępczych przekroju, wzory (5.3) i .

Podobnie uczyniono dla modeli D i E, dla których przyjęto taki sam zastępczy moment bezwładności, pomimo występujących nacięć na przekrojach - rozdz. 4.3. Wyniki zestawiono w tab. 5.4 - 5.9.

Tab. 5.4. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka D1

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
10,22	1,252	31,05	1,430	-14,2	8,68	1,18	26,5
20,12	2,651	64,31	2,962	-11,7	18,98	1,06	18,3
30,15	4,068	97,57	4,494	-10,5	29,19	1,03	16,2
40,21	5,448	129,54	5,967	-9,5	39,26	1,02	15,5
50,17	6,791	160,78	7,405	-9,0	50,52	0,99	12,8
59,91	7,959	191,45	8,818	-10,8	66,16	0,91	4,4

Tab. 5.5. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka D2

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
9,96	2,770	36,20	1,667	39,8	9,21	1,08	19,9
20,11	5,434	76,27	3,513	35,4	21,27	0,95	8,4
29,91	7,424	117,48	5,411	27,1	32,30	0,93	6,5
40,05	9,405	157,32	7,246	23,0	45,12	0,89	2,5
44,86	10,617	179,05	8,247	22,3	51,48	0,87	0,6

Tab. 5.6. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka D3

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
10,10	1,370	32,71	1,507	-10,0	9,77	1,03	16,3
20,12	2,857	68,56	3,158	-10,5	19,54	1,03	15,9
30,16	4,397	105,52	4,860	-10,5	30,69	0,98	11,9
39,71	5,884	140,63	6,478	-10,1	41,41	0,96	9,7
42,00	6,242	151,93	6,998	-12,1	43,98	0,95	9,3

Tab. 5.7. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka E1

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
9,95	1,314	25,87	1,192	9,3	11,41	0,87	0,7
20,09	2,867	54,89	2,528	11,8	25,09	0,80	-8,1
30,11	4,432	85,01	3,916	11,7	38,04	0,79	-9,4
34,97	5,201	99,98	4,605	11,5	45,01	0,78	-11,4
40,11	6,047	115,13	5,303	12,3	52,30	0,77	-12,9

Tab. 5.8. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka E2

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
10,58	1,906	37,14	1,711	10,2	8,81	1,20	27,9
19,56	3,674	73,18	3,371	8,3	18,47	1,06	18,2
30,14	5,780	117,35	5,405	6,5	29,7	1,01	14,7
35,13	6,793	139,32	6,417	5,5	35,2	1,00	13,3
40,12	7,781	162,25	7,473	4,0	40,36	0,99	12,9

Tab. 5.9. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka E3

Siła	Napręż. normal. w drewnie (badania)	Napręż. normal. w taśmie (badania)	Napręż. normal. zastępcze	Procentowa różnica naprężeń	Ugięcie (badania)	Współcz. sztywn.	Procentowa różnica sztywności
F [kN]	σ_d [MPa]	σ_f [MPa]	$\sigma_{d,zast}$ [MPa]	$\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	u [mm]	k [kN/mm]	k / k_{obl} [%]
10,07	1,721	33,08	1,524	11,5	9,70	1,04	16,6
20,02	3,449	65,50	3,017	12,5	21,33	0,94	7,8
30,05	5,038	99,57	4,586	9,0	32,33	0,93	6,8
40,15	6,793	133,64	6,156	9,4	44,46	0,90	4,1
45,21	7,475	151,17	6,963	6,8	51,97	0,87	0,5

Podobnej analizy dokonano również dla modelu B, z jedną wklejoną w przekrój taśmą w układzie pionowym. Wyniki przedstawiono w tab. 5.10 - 5.12. Moment bezwładności przekroju zastępczego dla belki B:

$$I_{y,zast} = 10926 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Charakterystyka sztywności belki B:

$$k_{obl} = \frac{1296}{23} \cdot \frac{E_d \cdot I_{y,zast}}{l^3} = \frac{1296}{23} \cdot \frac{0,76 \cdot 10926 \cdot 10^4}{3800^3} = 0,85 \text{ N/mm}$$

Tab. 5.10. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka B1

Siła <i>F</i> [kN]	Napręż. normal. w drewnie (badania) σ_d [MPa]	Napręż. normal. w taśmie (badania) σ_f [MPa]	Napręż. normal. zastępcze $\sigma_{d,zast}$ [MPa]	Procentowa różnica naprężeń $\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	Ugięcie (badania) <i>u</i> [mm]	Współcz. sztywn. <i>k</i> [kN/mm]	Procentowa różnica sztywności <i>k / k_{obl}</i> [%]
10,15	1,952	45,68	2,104	-7,8	11,20	0,91	6,6
20,09	3,884	90,81	4,183	-7,7	21,96	0,91	7,5
24,92	4,858	114,20	5,260	-8,3	26,90	0,93	8,7
30,21	6,085	140,89	6,490	-6,6	33,49	0,90	6,2
35,03	7,270	165,94	7,643	-5,1	40,21	0,87	2,9

Tab. 5.11. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka B2

Siła <i>F</i> [kN]	Napręż. normal. w drewnie (badania) σ_d [MPa]	Napręż. normal. w taśmie (badania) σ_f [MPa]	Napręż. normal. zastępcze $\sigma_{d,zast}$ [MPa]	Procentowa różnica naprężeń $\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	Ugięcie (badania) <i>u</i> [mm]	Współcz. sztywn. <i>k</i> [kN/mm]	Procentowa różnica sztywności <i>k / k_{obl}</i> [%]
10,21	1,687	46,19	2,128	-26,1	10,16	1,00	15,8
20,05	3,571	97,62	4,497	-25,9	21,73	0,92	8,3
30,21	5,318	152,01	7,002	-31,7	33,89	0,89	5,1
39,96	7,151	203,77	9,386	-31,3	45,32	0,88	4,1
50,02	8,846	268,30	12,358	-39,7	58,08	0,86	1,8

Tab. 5.12. Porównanie wyników badań z wynikami analitycznymi, belka B3

Siła <i>F</i> [kN]	Napręż. normal. w drewnie (badania) σ_d [MPa]	Napręż. normal. w taśmie (badania) σ_f [MPa]	Napręż. normal. zastępcze $\sigma_{d,zast}$ [MPa]	Procentowa różnica naprężeń $\sigma_d / \sigma_{d,zast}$ [%]	Ugięcie (badania) <i>u</i> [mm]	Współcz. sztywn. <i>k</i> [kN/mm]	Procentowa różnica sztywności <i>k / k_{obl}</i> [%]
10.02	1.925	40.75	1.877	2.5	8.32	1.20	29,8
20.08	3.926	85.65	3.945	-0.5	17.21	1.17	27,5
30.12	5.663	139.71	6.435	-13.6	25.85	1.17	27,4
34.97	6.782	166.04	7.648	-12.8	30.18	1.16	27,0
38.10	7.472	185.72	8.555	-14.5	33.69	1.13	25,2

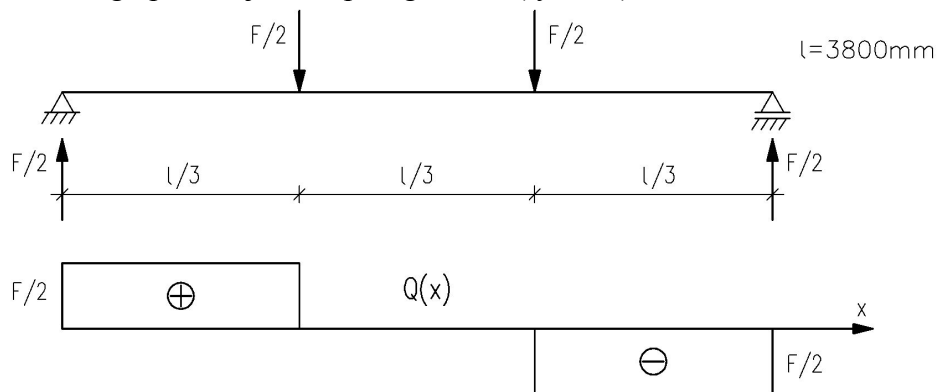
Analizę przeprowadzono dla każdej belki serii B, C, D, E i każdego przedstawionego w rozdz. 4.3 poziomo obciążenia. Wyniki zestawiono w tab. 5.1 - 5.12 oraz podano różnicę pomiędzy wynikami analitycznymi a wartościami z badań.

Procentowe różnice naprężeń i sztywności wahają się na poziomie ok. 20% poza belkami C3, D2, E2, oraz B2 gdzie różnice w naprężeniach sięgają 40%. Właściwie we wszystkich analizowanych belkach, poza C3 i E1, sztywność przekrojów uzyskana w badaniach jest wyższa aniżeli teoretyczna.

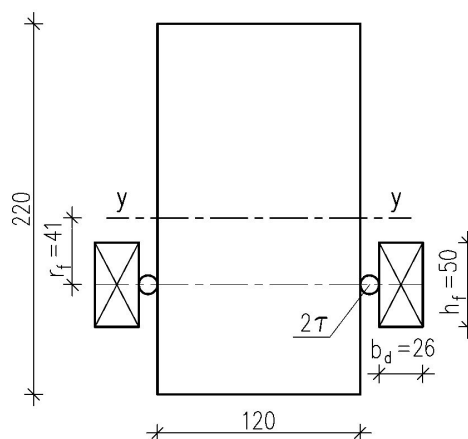
Stwierdzono, że nacięcia, o wymiarach zastosowanych w badaniach, nie mają wpływu na wartości i rozkład naprężeń przy zginaniu. Pęknięcia skurczowe nie zmniejszają w istotny sposób nośności belki zginanej, wpływają za to na stan naprężeń stycznych w drewnie.

W rzeczywistości nie ma wyselekcjonowanego drewna, pomimo metod sortowania, natomiast uzyskanie niezłej zgodności dla drewna niewyselekcjonowanego (o różnym stopniu nasilenia wad drewna) pozwala przyjąć, że metoda może być stosowana w praktyce. Należałoby oczywiście przeanalizować licniejszą próbę każdej z serii by móc stwierdzić jednoznacznie, że można odpowiedzialnie stosować zastępczy przekrój belki do analizy naprężeń i sztywności, również dla belek z poziomymi pęknięciami skurczowymi.

Naprężenia styczne w spoinie można wyznaczyć na podstawie wykresu sił tnących (rys. 5.2) oraz ideowego przekroju zastępczego belki (rys. 5.3).



Rys. 5.2. Wykres sił tnących w próbie czteropunktowego zginania



Rys.5.3. Ideowy przekrój zastępczy belki C

Naprężenia styczne w rozpatrywanym przekroju można zapisać wzorem:

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q \cdot S_f}{h_f \cdot I_{y,zast}} \quad (5.8)$$

gdzie:

$$Q = \frac{F}{2} \quad (5.9)$$

$$S_f = A_f \cdot r_f \quad (5.10)$$

$$A_f = b_d \cdot h_f \quad (5.11)$$

Ostatecznie naprężenia styczne wyrażają się wzorem:

$$\tau = \frac{F \cdot A_f \cdot r_f}{4 \cdot h_f \cdot I_{y,zast}} \quad (5.12)$$

Poniżej przedstawiono w tab. 5.13 - 5.15 porównanie naprężeń stycznych w belce C uzyskanych w badaniach oraz uzyskanych na podstawie wzoru 5.2.

Tab. 5.13. Porównanie wartości naprężeń stycznych w spoinie , belka C1

Siła F [kN]	Max naprężenie styczne w spoinie (badania) τ_{bad} [MPa]	Obliczeniowe naprężenie styczne w spoinie τ_{obl} [MPa]	Procentowa różnica naprężeń τ_{bad} / τ_{obl} [%]
10,13	0,027	0,024	11,3
20,11	0,052	0,048	9,4
30,15	0,081	0,072	12,6
40,07	0,109	0,096	13,7
50,05	0,136	0,119	13,7
60,01	0,165	0,143	15,6

Tab. 5.14. Porównanie wartości naprężeń stycznych w spoinie , belka C2

Siła F [kN]	Max naprężenie styczne w spoinie (badania) τ_{bad} [MPa]	Obliczeniowe naprężenie styczne w spoinie τ_{obl} [MPa]	Procentowa różnica naprężeń τ_{bad} / τ_{obl} [%]
10,13	0,027	0,024	11,3
20,11	0,052	0,048	9,4
30,15	0,081	0,072	12,6
40,07	0,109	0,096	13,7
50,05	0,136	0,119	13,7

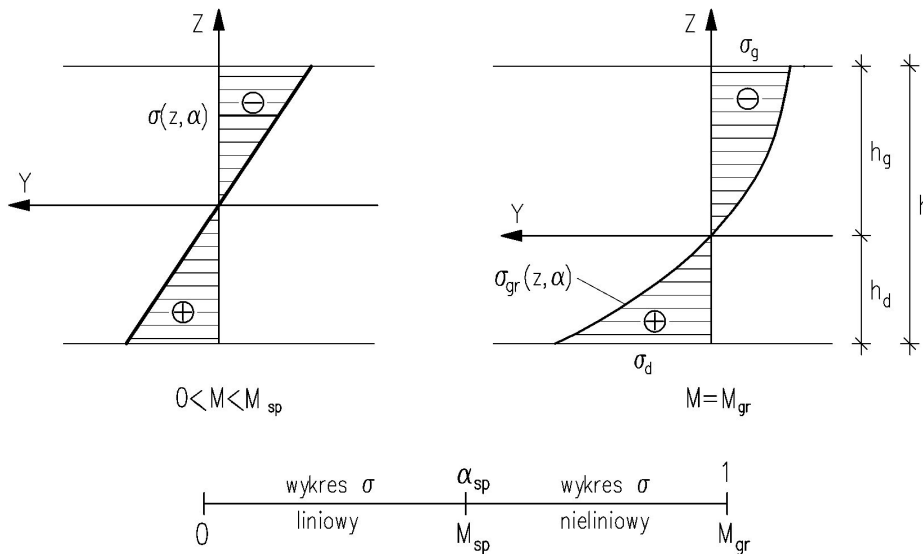
Tab. 5.15. Porównanie wartości naprężeń stycznych w spoinie , belka C3

Siła F [kN]	Max naprężenie styczne w spoinie (badania) τ_{bad} [MPa]	Obliczeniowe naprężenie styczne w spoinie τ_{obl} [MPa]	Procentowa różnica naprężeń τ_{bad} / τ_{obl} [%]
10.00	0.026	0.024	9.4
20.18	0.052	0.048	9.2
30.00	0.078	0.072	8.7
35.09	0.104	0.095	9.4
39.97	0.118	0.107	10.0

Maksymalne wartości naprężeń stycznych uzyskane w badaniach są wyższe od wartości obliczeniowych ze względu na nierównomierny przyrost siły (naprężeń normalnych) w taśmie. W miejscach, gdzie przyrost siły (naprężeń normalnych) w taśmie jest większy od teoretycznego, naprężenia styczne mają większą wartość. Różnice dla analizowanego modelu C są jednak dość nieznaczne i wynoszą ok. kilkanaście procent.

5.2. MODEL WŁASNY OPISUJĄCY PRACĘ PRZEKROJÓW WZMOCNIONYCH Z IDENTYFIKACJĄ NIELINIOWOŚCI BELKI

5.2.1. Założenia modelu



Rys. 5.4 Wykresy naprężeń w drewnie, w zakresie liniowym i nieliniowym

W zakresie sprężystym, $0 \leq M \leq M_{sp}$ naprężenia są równe:

$$\sigma_{sp}(z, M) = \frac{M \cdot z}{I} \quad (5.13)$$

Przyjmuje się, że całkowite wyteżenie przekroju następuje po osiągnięciu M_{gr} . Jako miarę wyteżenia przekroju w zakresie od 0 do M_{gr} przyjmuje się parametr α określony wzorem:

$$\alpha = \frac{M}{M_{gr}} \quad (5.14)$$

wtedy:

$$\alpha_{sp} = \frac{M_{sp}}{M_{gr}} \quad (5.15)$$

$$\alpha_{gr} = \frac{M_{gr}}{M_{gr}} = 1 \quad (5.16)$$

gdzie α w liniowym zakresie naprężeń:

$$0 \leq \alpha \leq \alpha_{sp} \quad (5.17)$$

zaś w nieliniowym zakresie naprężeń:

$$\alpha_{sp} < \alpha \leq 1 \quad (5.18)$$

W zakresie liniowym można zapisać:

$$\sigma_{sp}(z, M) = \sigma_{sp}(z, \alpha) \quad (5.19)$$

gdzie:

$$\sigma_{sp}(z, \alpha) = \frac{\alpha \cdot z \cdot M_{gr}}{I} \quad (5.20)$$

W zakresie nieliniowym wykres naprężeń zmienia się od:

$$\sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) = \sigma_{sp}(z, \alpha) \quad (5.21)$$

Można przyjąć, że dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$:

$$\sigma(z, \alpha) = \sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) \cdot (1 - a) + a \cdot \sigma_{gr}(z) \quad (5.22)$$

gdzie: $0 < a \leq 1$

Wynika stąd, że dla $a = 0$:

$$\sigma(z, \alpha) = \sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) \quad (5.23)$$

Zaś dla $a = 1$:

$$\sigma(z, \alpha) = \sigma_{gr}(z) \quad (5.24)$$

Parametr a można wyrazić przez α . Przyjmuje się, że:

$$a = k \cdot \alpha + p \quad (5.25)$$

gdzie: k, p - parametry, które należy określić.

$$a = 0 \quad \text{dla} \quad \alpha = \alpha_{sp} \quad \Rightarrow \quad 0 = k \cdot \alpha_{sp} + p \quad (5.26)$$

$$a = 1 \quad \text{dla} \quad \alpha = 1 \quad \Rightarrow \quad 1 = k \cdot 1 + p \quad (5.27)$$

Po rozwiązaniu układu równań (5.26) i (5.27) otrzymuje się:

$$k = \frac{1}{1 - \alpha_{sp}} \quad (5.28)$$

$$p = -\frac{\alpha_{sp}}{1 - \alpha_{sp}} \quad (5.29)$$

Stąd:

$$a = -\frac{\alpha - \alpha_{sp}}{1 - \alpha_{sp}} \quad (5.30)$$

oraz:

$$1 - a = -\frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{sp}} \quad (5.31)$$

Dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ można zatem zapisać:

$$\sigma(z, \alpha) = \sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) \cdot \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{sp}} + \frac{\alpha - \alpha_{sp}}{1 - \alpha_{sp}} \cdot \sigma_{gr}(z) \quad (5.32)$$

W całym zakresie zmienności można napisać:

$$\sigma(z, \alpha) = \begin{cases} \sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) & \text{dla } 0 < \alpha \leq \alpha_{sp} \\ \sigma_{sp}(z, \alpha_{sp}) \cdot \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{sp}} + \frac{\alpha - \alpha_{sp}}{1 - \alpha_{sp}} \cdot \sigma_{gr}(z) & \text{dla } \alpha_{sp} < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (5.33)$$

Zamiast parametru α można użyć M :

$$\sigma(z, M) = \begin{cases} \frac{M \cdot z}{I} & \text{dla } 0 < M \leq M_{sp} \\ \frac{M_{sp} \cdot z}{I} \cdot \frac{M_{gr} - M}{M_{gr} - M_{sp}} + \frac{M - M_{sp}}{M_{gr} - M_{sp}} \cdot \sigma_{gr}(z) & \text{dla } M_{sp} < M \leq M_{gr} \end{cases} \quad (5.34)$$

Dla dowolnej wartości parametru α , gdzie $0 \leq \alpha \leq 1$ związek między rozkładem odkształceń $\varepsilon(z, \alpha)$ i rozkładem naprężeń $\sigma(z, \alpha)$ przyjmuje się w postaci:

$$\sigma(z, \alpha) = K_{\alpha} \cdot \varepsilon(z, \alpha) \quad (5.35)$$

Związek ten można zaakceptować w przypadku słabej nieliniowości fizycznej materiału i słabej niejednorodności materiału. Wykres zależności „ $F-u$ ” powinien mieć kształt, z którego wynika, że globalnie belka zachowuje się w sposób słabo nieliniowy (ścieżka równowagi dla belki nie powinna odbiegać w istotny sposób od linii prostej).

Dla każdej wartości parametru α , gdzie $0 \leq \alpha \leq 1$, obciążeniem przekroju jest moment M_{α} , gdzie $0 \leq M_{\alpha} \leq M_{gr}$. Współczynnik K_{α} wyznacza się z warunku równowagi momentów:

$$M_{\alpha} = \int \sigma(z, \alpha) y dA = K_{\alpha} \int \varepsilon(z, \alpha) z dA \quad (5.36)$$

Stąd:

$$K_{\alpha} = \frac{M_{\alpha}}{\int \varepsilon(z, \alpha) z dA} \quad (5.37)$$

Funkcje $\varepsilon(z, \alpha)$ oraz $\sigma(z, \alpha)$ można aproksymować funkcją liniową dla M_{sp} oraz funkcją nieliniową dla $M_{sp} < M_{\alpha} \leq M_{gr}$ (rys. 5.4). Do aproksymacji tych funkcji można przyjmować różne wielomiany. Poza warunkiem równowagi momentów spełniony musi być również warunek równowagi naprężeń wzdłuż osi y :

$$\int_0^h \sigma(z, \alpha) dz = 0 \quad (5.38)$$

gdzie $\sigma(z, \alpha)$ wyraża się wzorem (5.19).

Dla obciążeń M_{α} rosnących od zera do pewnej wartości M_{sp} (rys. 5.1) materiał pracuje w zakresie liniowo sprężystym, współczynnik K_{α} powinien mieć stałą wartość i jest on współczynnikiem sprężystości materiału w zakresie liniowym. Stałą wartość

współczynnika K_α w zakresie liniowo sprężystym oznacza się E_{sp} . W tym zakresie obowiązuje prawo Hooke'a:

$$\sigma(z, \alpha) = E_{sp} \cdot \varepsilon(z, \alpha) \quad (5.39)$$

gdzie: $0 \leq \alpha \leq \alpha_{sp}$

Dla $\alpha > \alpha_{sp}$ współczynnik K_α powinien być mniejszy od E_{sp} i wtedy zaczyna się nieliniowa praca materiału. Najmniejszą wartość współczynnik K_α powinien mieć dla $\alpha = 1$. Tę wartość oznacza się jako K_{gr} . Dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ w pobliżu osi obojętnej przekroju materiał pracuje w zakresie liniowo-sprężystym, a w włóknach bardziej oddalonych w zakresie nieliniowym. Wtedy wzór (5.39) jest wzorem przybliżonym, gdyż w jednym przekroju mamy różne współczynniki sprężystości. Stąd, dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ współczynnik K_α wyznaczony ze wzoru (5.37) nie jest modulem sprężystości, lecz jest parametrem, który można traktować jako pewną miarę zmniejszenia sztywności przekroju w zakresie pracy nieliniowej.

Jeśli współczynnik K_α zmienia się w przybliżeniu liniowo, to analogicznie do wzoru (5.32) można przyjąć, że dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ zachodzi zależność:

$$K_\alpha = E_{sp} \cdot \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{sp}} + K_{gr} \cdot \frac{\alpha - \alpha_{sp}}{1 - \alpha_{sp}} \quad (5.40)$$

Nierówność $K_\alpha < E_{sp}$ dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ oznacza, że dla obciążeń $M_\alpha > M_{sp}$ maleje sztywność przekroju na zginanie. Stosownie do wzoru (5.35) sztywność przekroju na zginanie B_α dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ można określić wzorem:

$$B_\alpha = K_\alpha \cdot I \quad (5.41)$$

gdzie: I - moment bezwładności przekroju zastępczego belki.

Stąd w całym zakresie zmienności α sztywność przekroju na zginanie określona jest następująco:

- dla $0 \leq \alpha \leq \alpha_{sp}$

$$B_\alpha = E_{sp} \cdot I \quad (5.42)$$

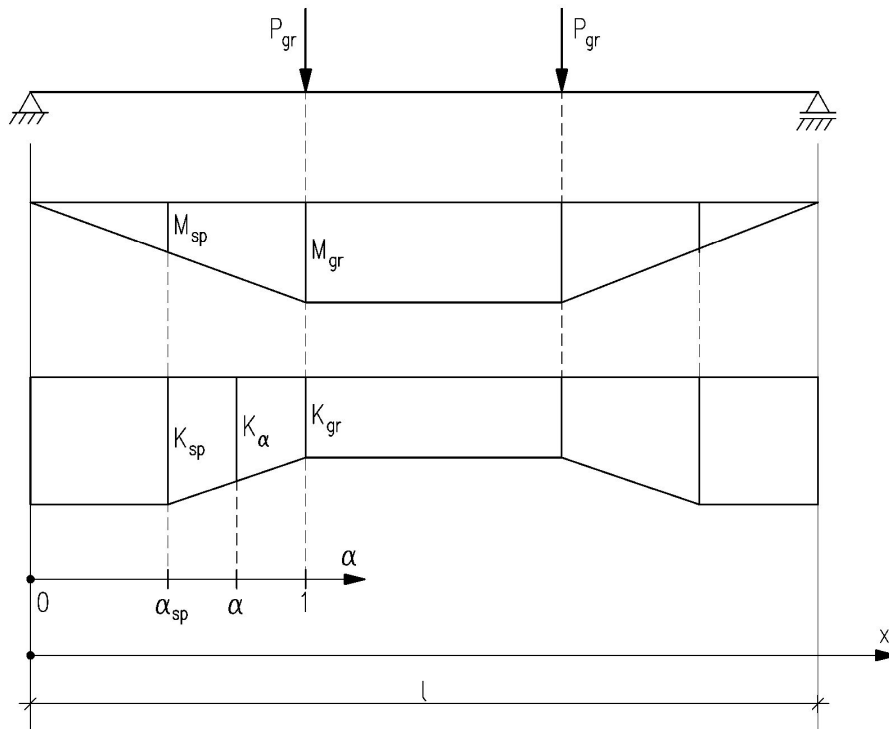
- dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$

$$B_\alpha = K_\alpha \cdot I \quad (5.43)$$

Stosując wzór (5.41) można scharakteryzować efekt nieliniowej pracy materiału za pomocą zmiennej, obniżonej sztywności przekroju na zginanie. Można zatem, stosując wzory (5.42), (5.43), ocenić wpływ nieliniowej pracy materiału na kształt osi odkształconej belki. W tym celu, przy danym obciążeniu, należy określić przedziały liniowej i nieliniowej pracy belki i przyporządkować im odpowiednie sztywności. Przyjmując np. obciążenie graniczne mamy sytuację przedstawioną na rys. 5.5.

Przeliczając we wzorach (5.42) i (5.43) zmienną α na zmienną x (wg rys. 5.13) można napisać równanie osi odkształconej belki (5.44). Równanie to ma charakter przybliżony, gdyż zostało ono wyprowadzone przy założeniu płaskich przekrojów.

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = -\frac{M(x)}{B(x)} \quad (5.44)$$



Rys. 5.5. Wykresy momentu zginającego M i współczynnika K_α

Znajomość współczynnika K_α pozwala zbudować przybliżony opis słabej nieliniowości belki dla naprężeń i odkształceń średnich w strefie ściskanej lub rozciąganej przekroju.

Z warunku równowagi naprężeń rzutowanych na oś y i ze wzoru (5.35) wynika, że

$$\int_{A_g} \sigma(z, \alpha) dA_g = \int_{A_d} \sigma(z, \alpha) dA_d \quad (5.45)$$

gdzie: A_g - pole powierzchni wykresu naprężeń nad osią obojętną przekroju,
 A_d - pole powierzchni wykresu naprężeń pod osią obojętną przekroju.

stąd i z (5.35) wynika, że

$$\int_{A_g} \sigma(z, \alpha) dA_g = K_\alpha \int_{A_g} \varepsilon(z, \alpha) dA_g \quad (5.55)$$

oraz

$$\int_{A_d} \sigma(z, \alpha) dA_d = K_\alpha \int_{A_d} \varepsilon(z, \alpha) dA_d \quad (5.56)$$

Dla dowolnego α naprężenia i odkształcenia średnie w górnej i dolnej części przekroju są równe:

$$\sigma_{g,\dot{s}r} = \frac{1}{A_g} \int_{A_g} \sigma(z, \alpha) dA_g, \quad \varepsilon_{g,\dot{s}r} = \frac{1}{A_g} \int_{A_g} \varepsilon(z, \alpha) dA_g \quad (5.57)$$

$$\sigma_{d,\dot{s}r} = \frac{1}{A_d} \int_{A_d} \sigma(z, \alpha) dA_d, \quad \varepsilon_{d,\dot{s}r} = \frac{1}{A_d} \int_{A_d} \varepsilon(z, \alpha) dA_d \quad (5.58)$$

Ze wzorów (5.55) - (5.58) wynika, że dla każdego α

$$\sigma_{g,śr} = K_{\alpha} \cdot \varepsilon_{g,śr} \quad (5.59)$$

$$\sigma_{d,śr} = K_{\alpha} \cdot \varepsilon_{d,śr} \quad (5.60)$$

W dalszym ciągu, z uwagi na wzory (5.59), (5.60) można zapisać:

$$\sigma_{śr} = K_{\alpha} \cdot \varepsilon_{śr} \quad (5.61)$$

bez rozróżnienia górnej i dolnej części przekroju.

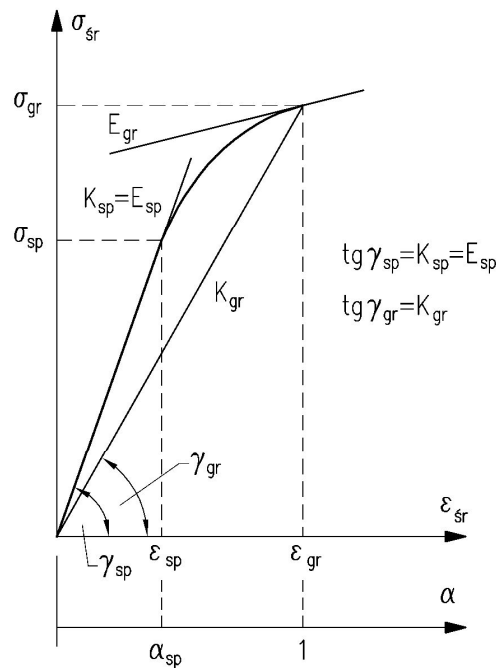
Równanie (5.61) umożliwia odtworzenie związku konstytutywnego dla naprężeń i odkształceń średnich w sensie określonym wyżej.

Dla $0 \leq \alpha \leq \alpha_{sp}$ materiał pracuje w zakresie liniowo-sprężystym i zachodzi równanie:

$$\sigma_{śr} = K_{\alpha} \cdot \varepsilon_{śr} = E_{sp} \cdot \varepsilon_{śr} \quad (5.62)$$

Równanie (5.62) zachodzi nie tylko dla średnich lecz dla dowolnych naprężeń i odkształceń i jest to związek konstytutywny w zakresie liniowo-sprężystym. Dla niesprężystej pracy materiału, dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$, przyjmuje się:

$$\sigma_{\alpha,śr} = a \cdot \varepsilon_{\alpha,śr}^2 + b \cdot \varepsilon_{\alpha,śr} + c \quad (\text{parabola madrycka}) \quad (5.63)$$



Rys. 5.6 Wykres „ $\sigma_{śr}(\alpha) - \varepsilon_{śr}(\alpha)$ ”

Współczynniki a , b , i c wyznacza się z warunków (rys. 5.6):

$$\sigma_{sp,śr} = K_{sp} \cdot \varepsilon_{sp,śr} \quad (5.64)$$

$$\left. \frac{d\sigma_{\alpha,śr}}{d\varepsilon_{\alpha,śr}} \right|_{\alpha=\alpha_{sp}} = 2a \cdot \varepsilon_{sp,śr} = K_{sp} \quad (5.65)$$

$$\sigma_{gr,śr} = K_{gr} \cdot \varepsilon_{gr,śr} \quad (5.66)$$

Po wykonaniu obliczeń otrzymuje się:

$$a = - \frac{(K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} \quad (5.67)$$

$$b = K_{sp} + \frac{2 \cdot (K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{sp, \dot{s}r} \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} \quad (5.68)$$

$$c = a \cdot \varepsilon_{sp, \dot{s}r}^2 \quad (5.69)$$

oraz

$$\sigma_{\alpha, \dot{s}r} = - \frac{(K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r} \cdot (\varepsilon_{\alpha, \dot{s}r}^2 + \varepsilon_{sp, \dot{s}r}^2)}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} + \left(K_{sp} + \frac{2 \cdot (K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{sp, \dot{s}r} \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} \right) \cdot \varepsilon_{\alpha, \dot{s}r} \quad (5.70)$$

$$\frac{d\sigma_{\alpha, \dot{s}r}}{d\varepsilon_{\alpha, \dot{s}r}} = E_{\alpha} = - \frac{2 \cdot (K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} \cdot \varepsilon_{\alpha, \dot{s}r} + K_{sp} + \frac{2 \cdot (K_{sp} - K_{gr}) \cdot \varepsilon_{sp, \dot{s}r} \cdot \varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{(\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r})^2} \quad (5.71)$$

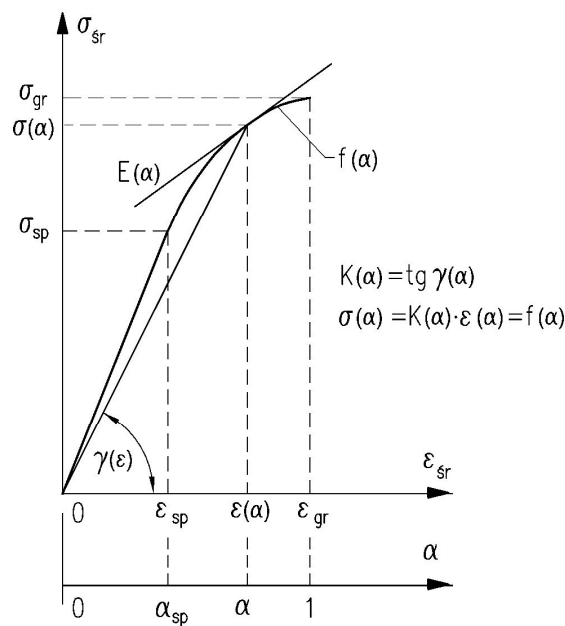
Należy podkreślić, że w równaniach (5.70) i (5.71) zmienną niezależną jest $\varepsilon_{\alpha, \dot{s}r}$.

Dla $\alpha = 1$ z równania (5.71) otrzymuje się:

$$E_{gr} = E_{sp} - 2 \cdot (K_{sp} - K_{gr}) \frac{\varepsilon_{gr, \dot{s}r}}{\varepsilon_{sp, \dot{s}r} - \varepsilon_{gr, \dot{s}r}} \quad (5.72)$$

Globalny związek (5.35) nie pozwala na identyfikację pełnego związku konstytutywnego w zakresie nieliniowym.

Jeżeli związek konstytutywny został zidentyfikowany dokładnie, to równania (5.61) i (5.63) powinny przedstawiać tę samą funkcję. Wyrażając wszystkie wielkości jako funkcje parametru α związek konstytutywny można napisać w dwóch równoważnych postaciach (rys. 5.7)



Rys. 5.7 Wykres „ $\sigma_{sr}(\alpha) - \varepsilon_{sr}(\alpha)$ ”

$$\sigma_{sr}(\alpha) = K(\alpha) \cdot \varepsilon_{sr}(\alpha) \quad (5.73)$$

$$\sigma_{sr}(\alpha) = f(\alpha) \quad (5.74)$$

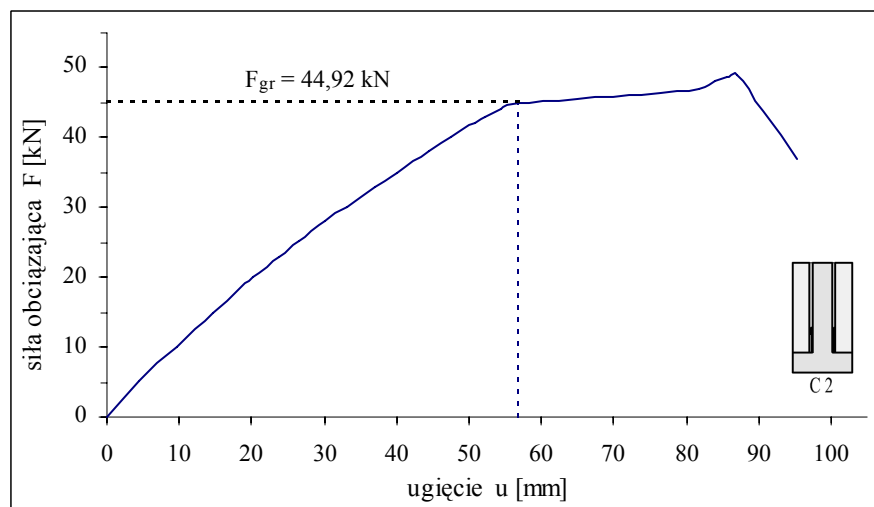
Zmienny moduł sprężystości określony jest wzorem:

$$E(\alpha) = \frac{d}{d\alpha} \sigma_{sr}(\alpha) = \frac{d}{d\alpha} [K(\alpha) \cdot \varepsilon_{sr}(\alpha)] = \frac{d}{d\alpha} f(\alpha) \quad (5.75)$$

Należy zwrócić uwagę na to, że wyrażenie (5.73) na ogół nie jest funkcją liniową, gdyż jest ono iloczynem dwóch funkcji. Dopasowanie związku konstytutywnego do wyników badań powinno się odbyć przez wyznaczenie $K(\alpha)$ na podstawie równań (5.55), (5.56), (5.73) lub (5.37). Parabola madrycka, jako przypadek szczególny wyznaczony na podstawie dwóch punktów skrajnych α_{sp} oraz $\alpha_{gr} = 1$, w przedziale $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ nie musi dokładnie pokrywać się z wynikiem doświadczalnym.

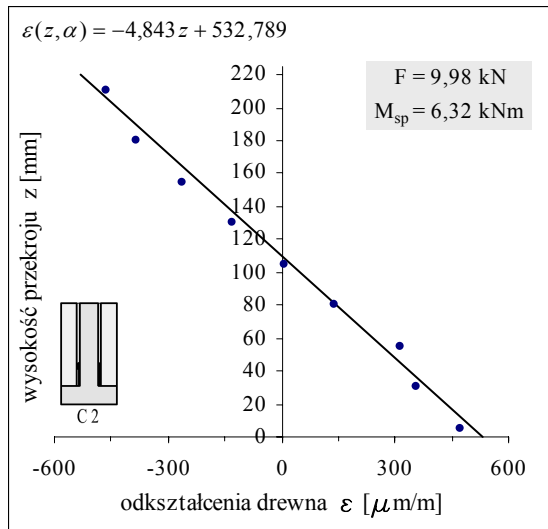
5.2.2. Weryfikacja modelu przeprowadzona dla belki C2

Weryfikację modelu przeprowadzono dla belki C2. Nie zdecydowano się na analizę uśrednionych wyników serii belek C, ze względu na zbyt małą liczbę prób, a co za tym idzie duży rozrzut wyników badanych elementów. Na rys. 5.8 przedstawiono ścieżkę równowagi analizowanej belki. Z wykresu zależności „ $F-u$ ” wynika że globalnie belka zachowuje się w sposób słabo nieliniowy (ścieżka równowagi dla belki nie odbiega w istotny sposób od linii prostej).

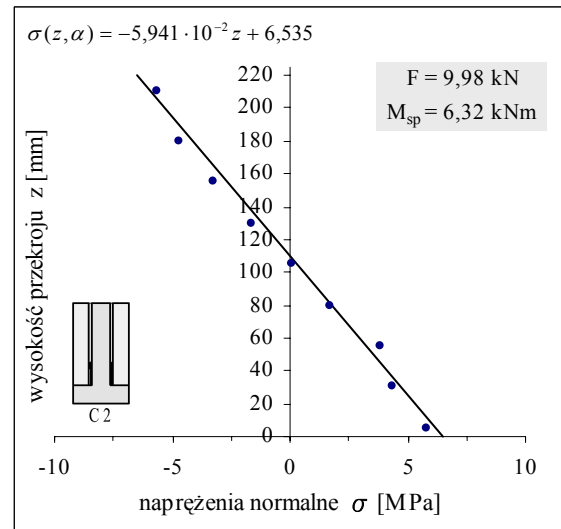


Rys. 5.8. Ścieżka równowagi belki C2

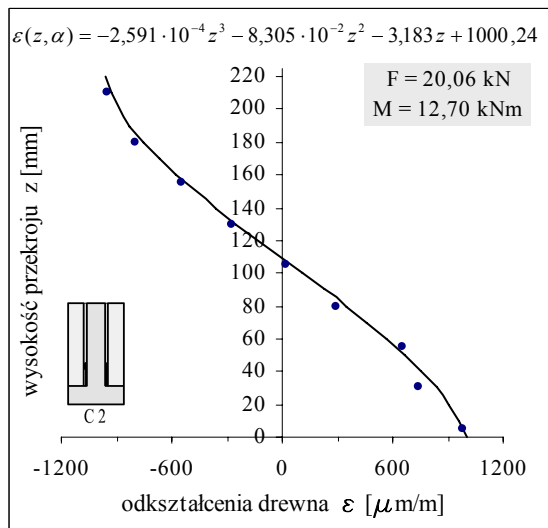
Dla belki C2 funkcje $\varepsilon(z, \alpha)$ oraz $\sigma(z, \alpha)$ aproksymowano, metodą najmniejszych kwadratów, funkcją liniową dla M_{sp} (rys. 5.9, 5.10) oraz wielomianem 3 stopnia dla $M_{sp} < M_{\alpha} \leq M_{gr}$ (rys. 5.11 - 5.18) w programie Mathematica 5.2, [60]. Do aproksymacji tych funkcji można przyjmować różne wielomiany. Współczynnik K_{α} wyznaczony został na podstawie warunku równowagi momentów (5.36). Dla poszukiwanych funkcji spełniony musi być również warunek (5.38).



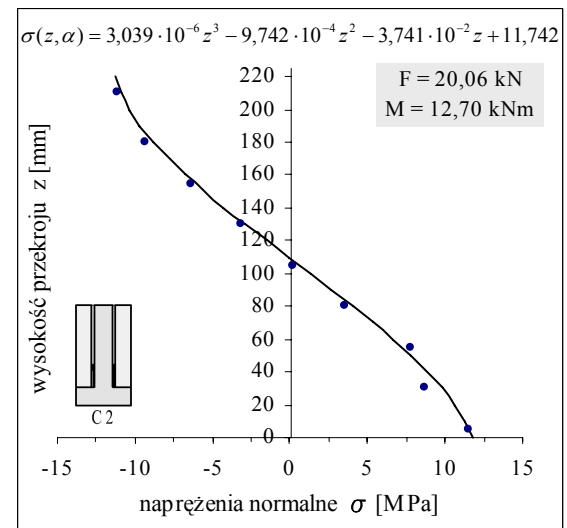
Rys. 5.9. Wykres odkształceń $\varepsilon(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 9,98 \text{ kN}$



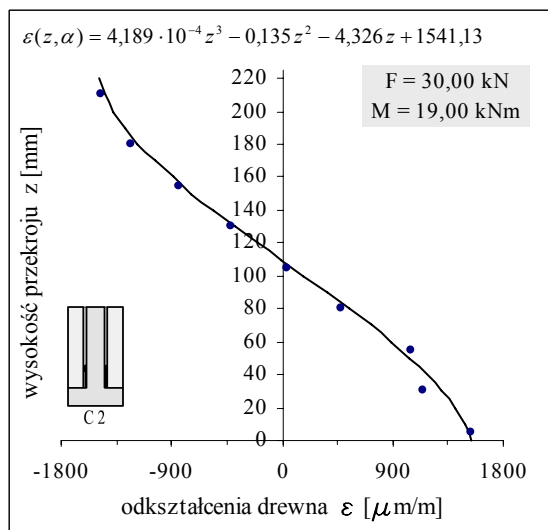
Rys. 5.10. Wykres naprężeń $\sigma(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 9,98 \text{ kN}$



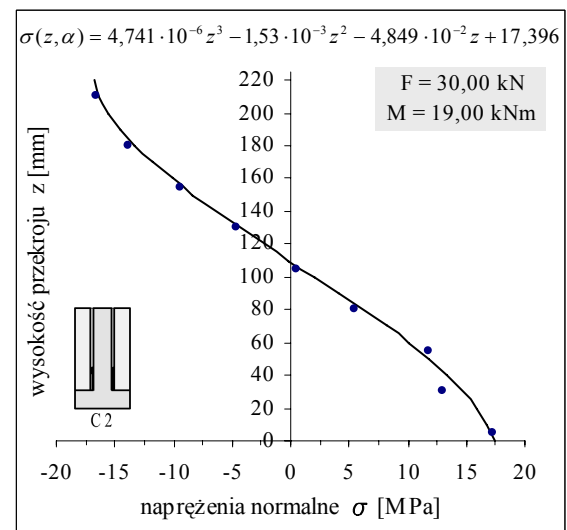
Rys. 5.11. Wykres odkształceń $\varepsilon(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 20,06 \text{ kN}$



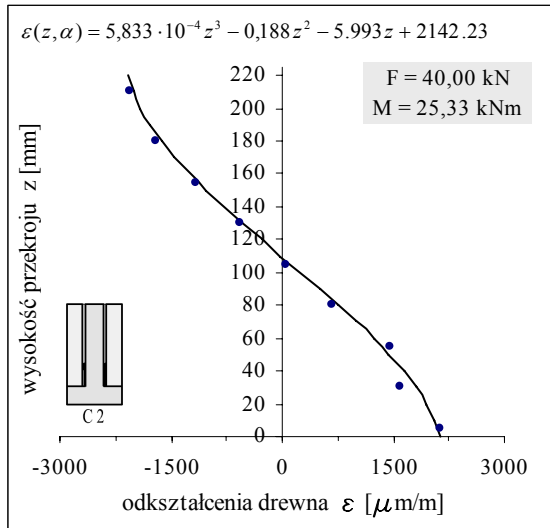
Rys. 5.12. Wykres naprężeń $\sigma(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 20,06 \text{ kN}$



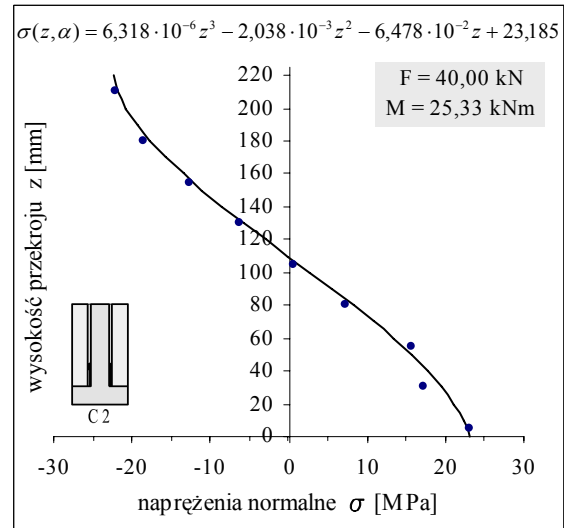
Rys. 5.13. Wykres odkształceń $\varepsilon(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 30 \text{ kN}$



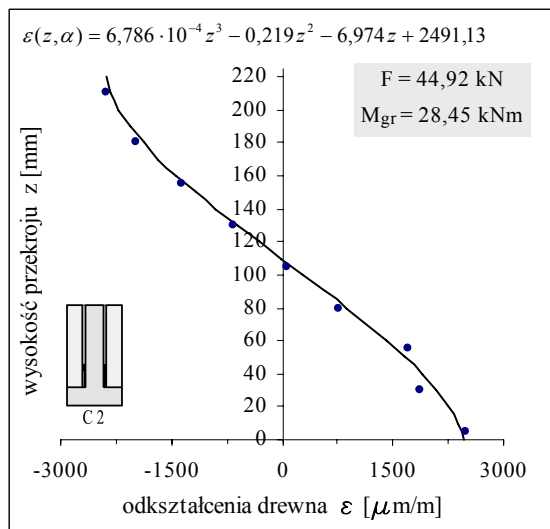
Rys. 5.14. Wykres naprężeń $\sigma(z, \alpha)$ w belce C2, $F = 30 \text{ kN}$



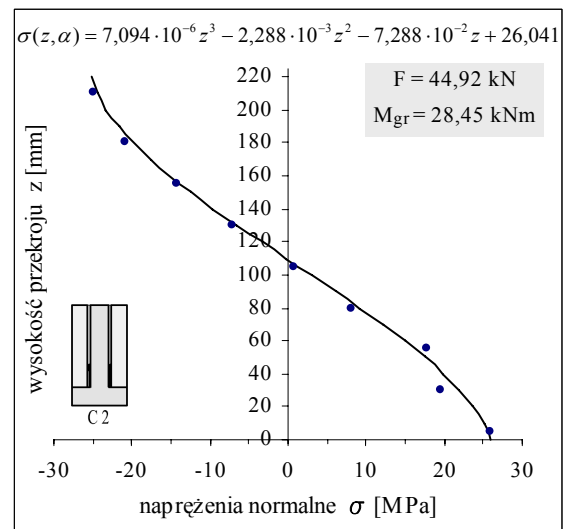
Rys. 5.15. Wykres odkształceń $\varepsilon(z,\alpha)$ w belce C2, $F = 40 \text{ kN}$



Rys. 5.16. Wykres naprężeń $\sigma(z,\alpha)$ w belce C2, $F = 40 \text{ kN}$



Rys. 5.17. Wykres odkształceń $\varepsilon(z,\alpha)$ w belce C2, $F = 44.92 \text{ kN}$



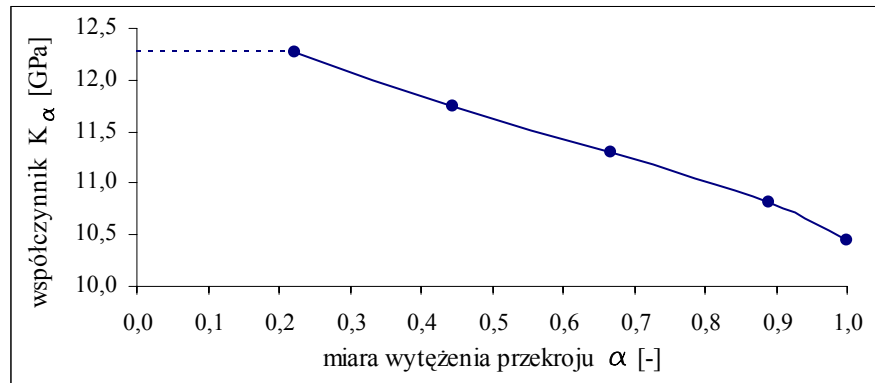
Rys. 5.18. Wykres naprężeń $\sigma(z,\alpha)$ w belce C2, $F = 44.92 \text{ kN}$

Tab. 5.16. Wartości współczynników K_α dla belki C2

Siła F [kN]	Moment zginający M [kNm]	Param. wyteż. przekroju α [-]	Współczynnik K_α [MPa]
9.98	6.32	0,222	12266
20.06	12.70	0,446	11742
30.00	19.00	0,668	11294
40.00	25.33	0,890	10822
44.92	28.45	1,000	10454

Wartości współczynników K_α dla różnych poziomów wyteżenia zestawiono w tab. 5.16. Najmniejszą wartość współczynnik K_α ma dla $\alpha = 1$. Tę wartość oznacza się jako K_{gr} . Na rys. 5.13 widać, że K_α dla $\alpha_{sp} < \alpha \leq 1$ zmienia się w przybliżeniu liniowo, wtedy zachodzi zależność wyrażana wzorem (5.40). Na rys. 5.13 linią przerywaną pokazano stałą

wartość współczynnika $K_\alpha = E_{sp}$ w zakresie liniowo-sprężystym, dla wartości parametru $0 < \alpha \leq \alpha_{sp}$.

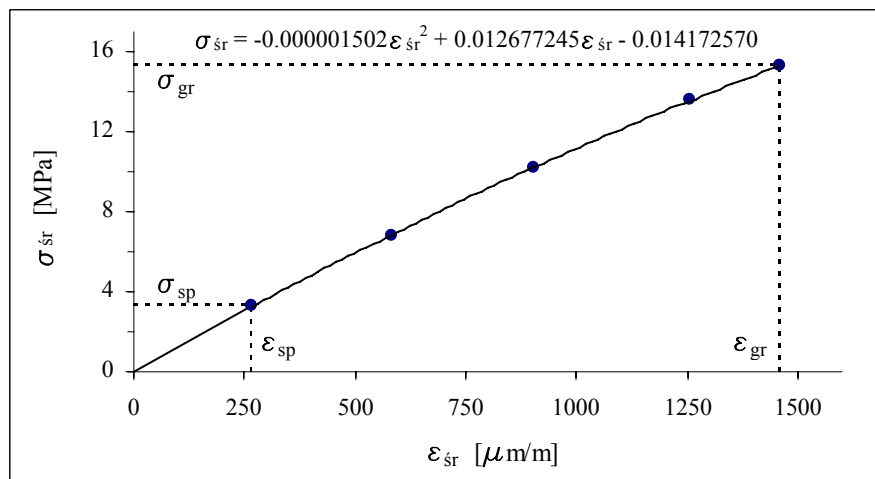


Rys. 5.19. Zmienność współczynnika K_α w zależności od wyężenia przekroju w belce C2

Wartości $\varepsilon_{sr}(\alpha)$ i $\sigma_{sr}(\alpha)$, zamieszczone w tab. 5.17, wyznaczono na podstawie wzorów (5.57) i (5.58).

Tab. 5.17. Wartości $\varepsilon_{sr}(\alpha)$ i $\sigma_{sr}(\alpha)$

Siła F [kN]	Moment zginający M [kNm]	Param. wyęż. przekroju α [-]	Odształcenia		Napężenia	
			$\varepsilon_{d,sr}$ [-]	$\varepsilon_{g,sr}$ [-]	$\sigma_{d,sr}$ [MPa]	$\sigma_{g,sr}$ [MPa]
9.98	6.32	0,222	266	-266	3,267	-3,267
20.06	12.70	0,446	581	-572	6,818	-6,717
30.00	19.00	0,668	903	-892	10,197	-10,076
40.00	25.33	0,890	1255	-1240	13,588	-13,424
44.92	28.45	1,000	1460	-1442	15,260	-15,074



Rys. 5.20. Wykres „ $\sigma_{sr}(\alpha) - \varepsilon_{sr}(\alpha)$ ” dla belki C2

Funkcja zawarta na rys. 5.20 dobrze odwzorowuje wyniki badań doświadczalnych wykonanych dla belki C2.

Z uwagi na dużą niejednorodność budowy drewna analizę należałoby przeprowadzić na dużej serii prób. Wyniki badań uzyskane na podstawie badań 3 belek jednej serii nie pozwalają na jednoznaczną weryfikację proponowanego modelu.

Przedstawiony sposób opracowania pozwala identyfikować parametry, w szczególności E , dla każdego pojedynczego przypadku w taki sposób by były spełnione warunki równowagi. Wynik analizy uzależniony jest wyników badań - rozkładów odkształceń oraz siły obciążającej (momentu zginającego). Odkształcenia i moment definiują związek konstytutywny, przy założeniu że spełniony jest warunek równowagi momentów.

Położenie osi obojętnej zależy od pomiaru odkształceń. Można przyjąć jeden moduł E dla strefy ściskanej (górnej) i rozciąganej (dolnej) z tego względu, że pola naprężeń σ_d i σ_g są równe.

Badania doświadczalne potwierdzają słabą nieliniowość pracy materiału do wyczerpania nośności.

Wydaje się, że uzyskano efektywną metodę uwzględnienia nieliniowej pracy materiału na sztywność belki.

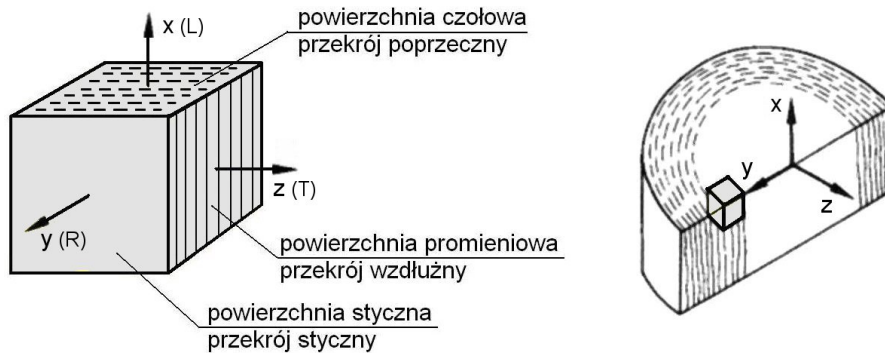
6. ANALIZA NUMERYCZNA

6.1. DREWNO JAKO MATERIAŁ ORTOTROPOWY

Drewno jest materiałem anizotropowym (właściwości zależą od kierunku - są wektorowe) i niejednorodnym (materiał nie jest cały wypełniony substancją jednego rodzaju). Właściwości drewna zależą silnie od anatomicznych kierunków pnia drzewa. ¹Trzy główne kierunki anatomiczne drewna przyporządkowano trzem osiom głównym, [169] - rys. 6.1:

- oś x w kierunku włókien drewna (wzdłuż włókien),
- oś y w kierunku promieniowym (w poprzek włókien i prostopadle do słoju rocznych),
- oś z w kierunku stycznym (w poprzek włókien i równoległe do słoju rocznych).

W literaturze obcojęzycznej kierunki oznaczane są następująco: L - wzdłuż włókien, T - stycznie, R - promieniowo).



Rys. 6.1. Przekroje drewna i kierunki osi układu współrzędnych, [169]

Przy określaniu występującego w konstrukcjach drewnianych złożonego stanu naprężeń powinna być uwzględniona anizotropia cech sprężystych materiału, [178].

Jeśli istnieją trzy osie prostopadłe do siebie z różnymi jednostkami miary mamy do czynienia anizotropią rombowa, w sensie fizyki kryształu Voigta, inaczej zwaną ortotropią. Zasada sprężystości dla ortotropii ma postać (zagadnienie przestrzenne trójwymiarowe):

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z \\
 \varepsilon_y &= s_{21}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z \\
 \varepsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z \\
 \gamma_{yz} &= s_{44}\tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= s_{55}\tau_{zx} \\
 \gamma_{xy} &= s_{66}\tau_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Pierwszy indeks oznacza kierunek odkształcenia, drugi kierunek naprężeń. Liczby 1,2,3 są przyporządkowane współrzędnym x,y,z i współczynniki sprężystości nazywamy odpowiednio:

- s_{ii} ($i = 1,2,3$) - współczynniki odkształceń liniowych,
- s_{ii} ($i = 4,5,6$) - współczynniki odkształceń postaciowych,
- s_{ik} ($i,k = 1,2,3; k \neq i$) - współczynniki rozciągania poprzecznego.

W praktyce inżynierskiej nie stosuje się współczynników sprężystości $s_{i,k}$ z równań (6.1) lecz ich odwrotności, czyli moduły sprężystości i sprężystości poprzecznej, [169]:

- moduł sprężystości wzdłuż włókien:

$$E_{11} = E_L = 1 / s_{11} \quad (6.2)$$

- moduł sprężystości w kierunku stycznym:

$$E_{22} = E_T = 1 / s_{22} \quad (6.3)$$

- moduł sprężystości w kierunku promieniowym:

$$E_{33} = E_R = 1 / s_{33} \quad (6.4)$$

- moduł sprężystości poprzecznej dla powierzchni promieniowej:

$$G_{12} = G_{LR} = 1 / s_{44} \quad (6.5)$$

- moduł sprężystości poprzecznej dla powierzchni czołowej:

$$G_{23} = G_{RT} = 1 / s_{55} \quad (6.6)$$

- moduł sprężystości poprzecznej dla powierzchni stycznej:

$$G_{13} = G_{LT} = 1 / s_{66} \quad (6.7)$$

O ile w rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym z drewna łatwo jest określić kierunek wzdłuż włókien drewna x o tyle wskazanie kierunków y i z jest praktycznie niemożliwe. Odrębne traktowanie tych kierunków jest nieuzasadnione z technicznego punktu widzenia, ponieważ w drewnie budowlanym słoje roczne tylko w rzadkich przypadkach są równoległe do krawędzi. Orientacja tych dwóch osi głównych jest więc w drewnie prawie zawsze wykluczona, [169]. O ortogonalności kierunków można mówić jedynie w małych próbkach.

Podstawowym składnikiem chemicznym i jednocześnie strukturalnym ścian komórkowych jest celuloza. Wiązania tlenowe w łańcuchach celulozowych są wiązaniami bardzo mocnymi, o przeciętnej energii 358,2 kJ/mol i stąd poszczególne łańcuchy w kierunku podłużnym wykazując dużą wytrzymałość, [127].

Drewno przy rozciąganiu, ściskaniu i zginaniu posiada różne moduły sprężystości wzdłuż i w poprzek włókien, jednak w praktyce moduły te są zbliżone i z praktycznego punktu widzenia przyjmowane jako jednakowe. Również wytrzymałości w kierunkach poprzecznych (promieniowym i stycznym) nieznacznie różnią się od siebie, wytrzymałość w kierunku promieniowym jest wyższa ze względu na opór stawiany przez licznie reprezentowane i silnie rozbudowane promienie rdzeniowe, [136].

Do opisu drewna w analizach, nie tylko numerycznych, rozróżnia się tylko dwa kierunki: wzdłuż i w poprzek włókien. Tak też postąpiono w dalszej części rozprawy.

6.2. WYTRZYMAŁOŚĆ MATERIAŁÓW ORTOTROPOWYCH

W celu określenia stanów bezpiecznych dla materiałów izotropowych, w oparciu o większość kryteriów (hipotez) wyężeńiowych, wystarczy znać wartość pewnej umownej granicy niebezpiecznej naprężeń, wyznaczonej z testu jednoosiowego rozciągania. W przypadku materiału kompozytowego jednokierunkowo zbrojonego włóknami - kompozytu włóknistego - (w uproszczeniu za taki możemy uważać drewno - rozdz. 5.1) granice niebezpieczne naprężeń przy rozciąganiu wzdłuż włókien i w kierunku

prostokątym do nich są różne. Dotyczy to również ściskania. Ponadto dochodzi do tego jeszcze granica naprężeń niebezpiecznych przy ścinaniu. Tym samym w miejsce jednej granicy wytrzymałości dla materiałów izotropowych tutaj pojawia się pięć różnych charakterystyk, [74]:

- X_t - wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien,
- X_c - wytrzymałość na ściskanie w kierunku włókien,
- Y_t - wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym do włókien,
- Y_c - wytrzymałość na ściskanie w kierunku poprzecznym do włókien,
- S_t - wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie głównych osi materiałowych.

Najczęściej stosowane hipotezy do oceny wytrzymałości kompozytów włóknistych przedstawiono w pracach [74] i [202].

Stosunkowo obszernie omówienie kryteriów wytrzymałościowych potencjalnie przydatnych w analizach dotyczących drewna można znaleźć w [141], m. in. kryterium Tsai-Wu, za pomocą którego można jednocześnie uwzględnić wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie czy też kryterium Hilla, pozwalające uwzględnić granice plastyczności w różnych kierunkach.

Pomimo tego, że w badanym przypadku wytrzymałościowym - zginaniu - wpływ odkształceń jest mniejszy niż w przypadkach gdzie występują strefy docisku (np. ściskanie w połączeniach prętów drewnianych konstrukcji dachowych) zdecydowano się uwzględnić kryterium anizotropowej plastyczności Hilla przydatne w analizach w trójosiowym stanie naprężenia [88], będące uogólnionym warunkiem Hubera-Misesa-Henky'ego przejścia w stan plastyczny dla metali podczas walcowania, które w tym stanie wykazują własności ortotropowe.

$$\sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} < \sigma^0 \quad (6.8)$$

Gdzie F , G , H , L , M , N są stałymi wyznaczanymi z poniższych równań na podstawie charakterystyk wytrzymałościowych materiału dla różnych kierunków.

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (6.9)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (6.10)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (6.11)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\sigma_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (6.12)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\sigma_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (6.13)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\sigma_{12}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (6.14)$$

gdzie: $\bar{\sigma}_{ii}$ - wytrzymałość materiału w kierunkach głównych anizotropii - 1,2,3,
 $\bar{\sigma}_{ij}$ - wytrzymałość materiału na ścinanie w płaszczyznach głównych kierunków anizotropii, odpowiednio: 2-3, 1-3, 1-2,
 σ^0 - wartość porównawcza, „referencyjny” punkt uplastycznienia,
 R_{ii} , R_{ij} - względne współczynniki wytrzymałości:

$$R_{ii} = \frac{\bar{\sigma}_{ii}}{\sigma^0} \quad (6.15)$$

$$R_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}}{\tau^0} \quad (6.16)$$

gdzie:

$$\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}} \quad (6.17)$$

Przy założeniu, że wytrzymałości w kierunkach poprzecznych 2, 3 są równe: $\bar{\sigma}_{22} = \bar{\sigma}_{33}$ (rozdz. 5.1) współczynniki kryterium opisane są następującymi zależnościami (przy przyjęciu wartości „referencyjnego” punktu uplastycznienia $\sigma^0 = \bar{\sigma}_{11}$):

$$R_{11} = 1 \quad (6.18)$$

$$R_{22} = R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\bar{\sigma}_{11}} \quad (6.19)$$

$$R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23} \sqrt{3}}{\bar{\sigma}_{11}} \quad (6.20)$$

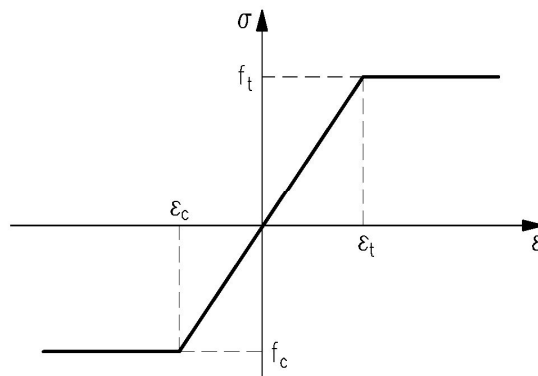
$$R_{12} = R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{12} \sqrt{3}}{\bar{\sigma}_{11}} \quad (6.21)$$

6.3. DANE PRZYJĘTE DO ANALIZY

W analizie numerycznej założono, że drewno w ujęciu makroskopowym jest materiałem homogenicznym oraz że oś materiałowa x (w kierunku wzdłuż włókien) jest równoległa do osi podłużnej elementu. Dla drewna przyjęto dwa modele pracy:

- model 1: model sprężysty,
- model 2: model sprężysto - idealnie plastyczny.

Dla jednoosiowego ściskania i rozciągania model 2 pokazano na rys. 6.2. Wykorzystano w nim, jako warunek przejścia w stan plastyczny, kryterium Hilla dla materiałów ortotropowych - rozdz. 6.2.



Rys 6.2. Sprężysto - idealnie plastyczny model materiału

Parametry materiałowe drewna i taśmy w badaniach numerycznych przyjęte zostały na podstawie badań własnych oraz danych literaturowych.

Moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien $E_x = E_{0,mean} = 7600$ MPa został wyznaczony doświadczalnie w badaniach własnych - rozdz 4.2. Zwrócić jednak należy uwagę, że został on wyznaczony jak dla izotropowego materiału. Analiza numeryczna wykazała, że aby uzyskać zgodność ugięć dla belki izotropowej o wartości modułu sprężystości $E_x = 7600$ MPa oraz dla belki anizotropowej (z przyjętymi poniżej zależnościami) należy przyjąć moduł $E_x = 8000$ MPa. Porównanie ścieżek równowagi belek świadkowych z badań oraz ścieżki równowagi wyznaczonej na podstawie wyników analizy numerycznej wskazuje na zasadność takiego rozwiązania. Ostatecznie do analizy numerycznej przyjęto powiększoną wartość (8000 MPa) modułu sprężystości wzdłuż włókien E_x .

Pozostałe moduły E_y , E_z , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} zostały określone na podstawie zależności z [23]:

$$E_x : E_y : E_z \approx 20 : 1,6 : 1 \quad (6.22)$$

$$G_{xy} : G_{xz} : G_{yz} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad (6.23)$$

$$E_x : G_{xy} \approx 14 : 1 \quad (6.24)$$

Ze względu na to, że zdecydowano się nie rozróżniać kierunków y i z (rozdz. 5.1) w analizie przyjęto, że:

$$E_y = E_z = E_x / 20 \quad (6.25)$$

$$G_{xy} = G_{xz} = 10 \cdot G_{yz} \quad (6.26)$$

Wartości współczynników Poissona ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} , zostały przyjęte na podstawie [23]. Wartości ν podawane w literaturze dotyczącej numerycznego modelowania drewna - [57], [82], [83], [90], [151], [216], [217], [213], [237] - różnią się znacząco. Wg [220] wartości ν zależą od udziału drewna późnego; im większy jego udział tym wyższe wartości współczynników.

Parametry dla taśm przyjęto na podstawie badań własnych, informacji producenta [95] o oraz danych zawartych w literaturze przedmiotu - [74], [85], [202]. Parametry dla kleju zostały przyjęte według danych producenta, [95]. Wykorzystane w analizie numerycznej stałe materiałowe zestawiono w tab. 6.1.

Tab. 6.1. Parametry materiałowe drewna i taśmy CFRP

	Moduł sprężystości podłużnej E [MPa]			Współczynnik Poisson'a ν [-]			Moduł sprężystości poprzecznej G [MPa]		
	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}
Drewno	8000	400	400	0,37	0,42	0,47	570	570	57
Taśma CFRP	165000	10000	10000	0,3	0,3	0,03	5000	5000	500
Klej		2500			0,3			-	

W zastosowanym kryterium Hilla nie ma możliwości uwzględnienia różnych wartości wytrzymałości drewna na ściskanie i rozciąganie. Z tego powodu zdecydowano się przyjąć mniejszą z wartości wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie wzdłuż włókien oraz wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien jako, że w badanym przypadku nie występuje rozciąganie w poprzek włókien.

Badania materiałowe zostały wykonane na małych próbkach bez wad. Wg [61] wpływ wad na obniżenie wytrzymałości drewna określa się współczynnikiem k_{wad} , a wpływ geometrycznego kształtu przekroju uwzględnia współczynnik k_{roz} . Iloczyn tych współczynników stanowi tzw. współczynnik jednorodności materiału:

$$k_j = k_{wad} \cdot k_{roz} \quad (6.27)$$

Wartości tych współczynników przyjęto wg [61].

Metodę zastosowania współczynników jednorodności zweryfikowano na podstawie wartości wytrzymałości na zginanie uzyskanych na małych próbkach bez wad (rozd. 4.2) oraz wyników uzyskanych dla 3 belek w skali technicznej - belek A, świadkowych (rozd. 4.3). Uzyskane wyniki - tab. 6.2, 6.3 - różnią się od siebie o 40%. Z tego powodu postanowiono zredukować, poza zastosowaniem współczynnika jednorodności, wszystkie przyjęte w analizie numerycznej cechy wytrzymałościowe drewna o wspomniane 40%. Zasadność przyjęcia zredukowanych wartości potwierdzają wyniki analizy numerycznej dla belki świadkowej, rys. 6.4. W badaniach materiałowych drewna nie oznaczano wytrzymałości na ścinanie w poprzek włókien. Na podstawie informacji zawartych w [61] przyjęto tę wartość jako równą połowie wartości wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien.

Tab. 6.2. Wytrzymałość drewna na zginanie uzyskana na małych próbkach, zredukowana o współczynnik jednorodności

Śr. wytrzymałość na zginanie (małe próbki) $f_{m,śr}$ [MPa]	Współczynnik jednorodności k_j [-]	Średnia wytrzymałość na zginanie $f_{m,śr}$ [MPa]
70,5	0,4	28,20

Tab. 6.3. Wytrzymałość drewna na zginanie uzyskana w badaniu belek A

Średnia siła niszcząca $F_{śr}$ [kN]	Średni niszczący moment zginający $M_{śr}$ [kNm]	Średnia wytrzymałość na zginanie $f_{m,śr}$ [MPa]
30,91	19,52	20,22

Tab. 6.4. Skorygowane parametry wytrzymałościowe drewna

	Śr. wytrzym. z badań $f_{śr}$ [MPa]	Współczynnik jednorodności k_j [-]	Wytrzymałość skorygowana ¹⁾ $f_{śr,kor}$ [MPa]
Rozciąganie wzdłuż włókien	80,5	0,27	15,5
Ściskanie wzdłuż włókien	40,8	0,7	18,9
Ściskanie w poprzek włókien	7,8	0,65	3,6
Ścinanie wzdłuż włókien	6,0	-	6,0 ²⁾
Ścinanie w poprzek włókien	3,0 ³⁾	-	3,0

¹⁾ wyjaśnienie w tekście

²⁾ wartość uzyskana w badaniu wg PN-EN 408

³⁾ połowa wartości na ścinanie wzdłuż włókien, wg [61]

Ostatecznie do analizy przyjęto, zgodnie z oznaczeniami z rozdz. 6.2, granice plastyczności zamieszczone w tab. 6.5.

Tab. 6.5. Granice plastyczności przyjęte do analizy

Granice plastyczności [MPa]						
σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{13}	σ_{23}	σ^0
15,5	3,6	3,6	6,0	6,0	3,0	15,5

Na podstawie wartości granic plastyczności z tab. 6.5 oraz wzorów (6.18)-(6.21) wyznaczono względne współczynniki wytrzymałości (plastyczności):

$$R_{11} = 1, \quad R_{22} = R_{33} = 0,24, \quad R_{12} = R_{13} = 0,67, \quad R_{23} = 0,33.$$

6.4. MODELOWANIE NUMERYCZNE METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Obliczenia numeryczne, za pomocą metody elementów skończonych, wykonano w module Standard środowiska ABAQUS 6.5, [1]. Pakiet ten daje możliwość trójwymiarowej analizy w zakresie sprężysto-plastycznym elementów z materiału ortotropowego i dodatkowo rozwiązania zadania kontaktowego.

Analizie poddano 8 modeli: 4 belki (A, B, C i F), z dwoma różnymi modelami pracy drewna (rozd. 6.3):

- praca drewna, kleju i taśm w zakresie sprężystym,
- praca drewna w zakresie sprężysto-plastycznym z uwzględnieniem kryterium anizotropowej plastyczności Hilla; praca kleju i taśm w zakresie sprężystym.

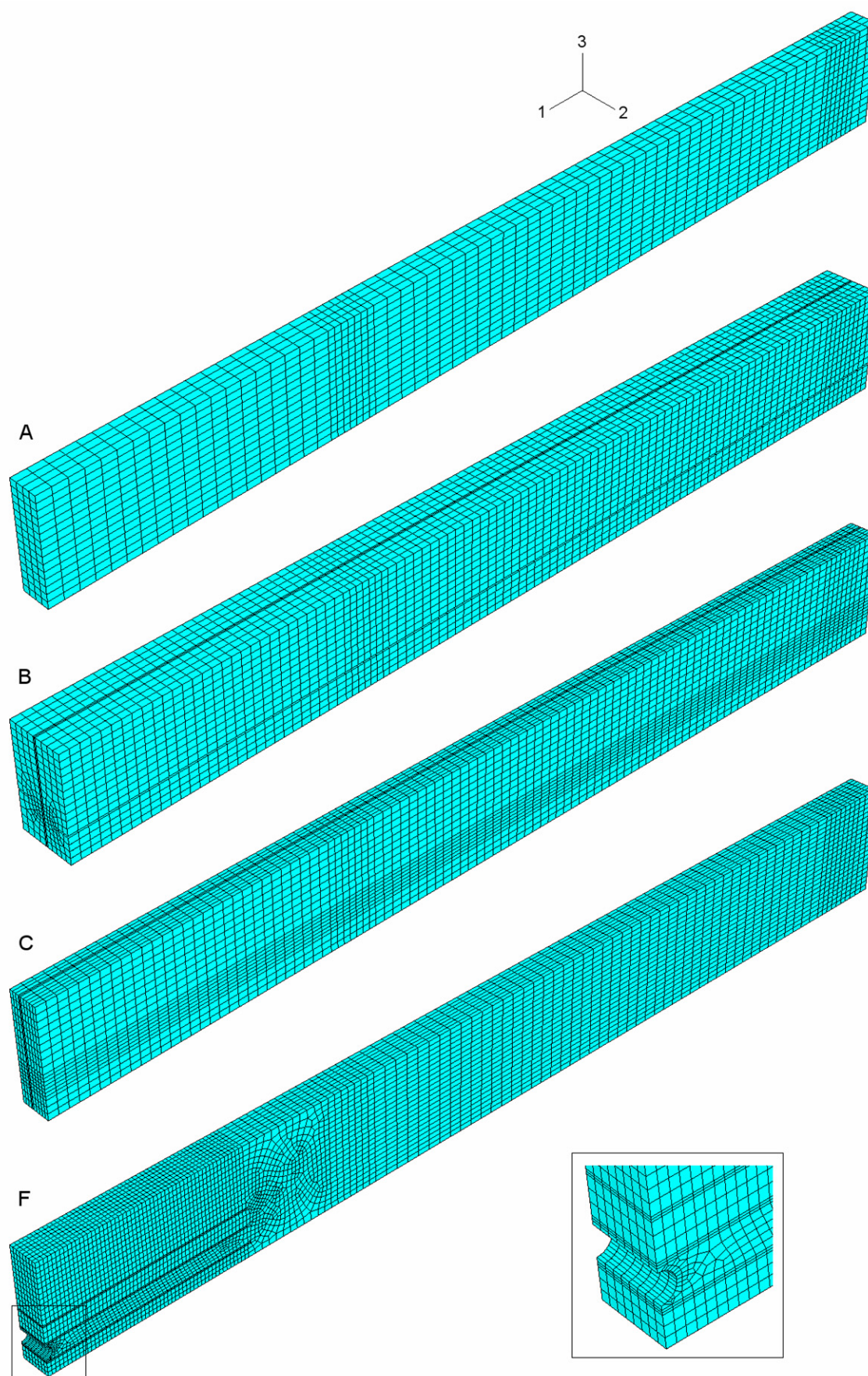
W obliczeniach wykorzystano symetrię badanych belek dla zmniejszenia liczby elementów skończonych, odcięte części zostały zastąpione blokadą odpowiednich przemieszczeń i kątów obrotu. Dokonano analizy na połowie długości połowy belki B (jedna oś symetrii, niesymetryczne nacięcia z dwu stron), oraz 1/4 belek: A, C i F (dwie osie symetrii). Siatki elementów skończonych przedstawiono na rys. 6.3.

Drewno oraz klej modelowano za pomocą ośmiowęzłowych elementów przestrzennych o symbolu C3D8, zaś wkładki w postaci taśm kompozytowych CFRP za pomocą czterowęzłowych elementów powłokowych o symbolu S4. Liczbę elementów i węzłów, z których składają się poszczególne modele pokazano w tab. 6.6.

Na granicy warstw założono ciągłość przemieszczeń. Do modelowania kontaktu użyto opcji „tie”, która zrównuje przemieszczenia zadanych powierzchni kontaktowych.

Tab. 6.6. Liczba elementów i węzłów analizowanych modeli

model	belka A	belka B	belka C	belka F
liczba elementów	4 440	22 565	19 950	27 456
liczba węzłów	6 000	25 864	23 320	32 301

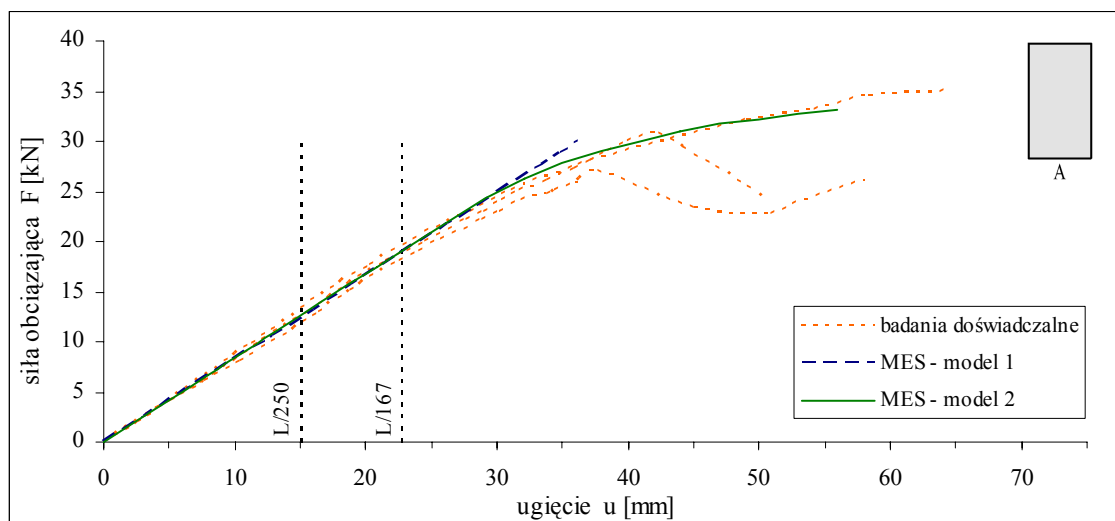


Rys. 6.3. Podział na elementy skończone, odpowiednio od góry: $\frac{1}{4}$ belki A, $\frac{1}{2}$ belki B, $\frac{1}{4}$ belki C, $\frac{1}{4}$ belki F

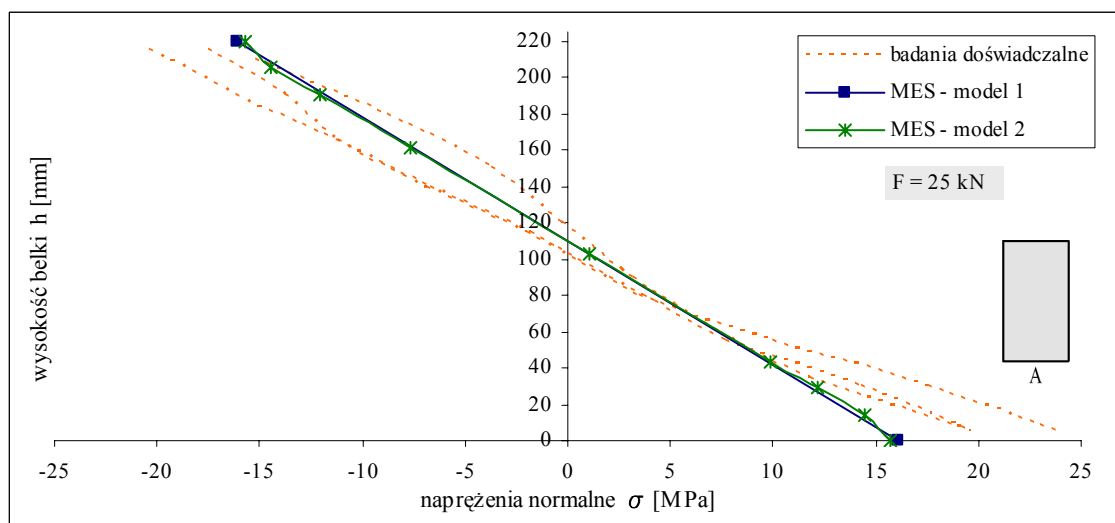
6.5. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Przyjęte w rozdz. 6.3 stałe materiałowe drewna oraz granice plastyczności zostały przetestowane na modelu belki A (niewzmocnionej). Wartości ugięć, zarówno dla modelu 1 (praca drewna w zakresie sprężystym) jak i modelu 2 (praca drewna w zakresie sprężysto-plastycznym), są zbliżone do wartości ugięć uzyskanych w badaniach doświadczalnych - rys. 6.4. Analiza wartości naprężeń normalnych w drewnie σ_x wykazuje dość dobrą zgodność dla modelu 1 z badaniami doświadczalnymi (poza belką A1). Wartości są w skrajnych włóknach ściskanych o ok. 10% a w rozciąganych o ok. 25% niższe od wyników doświadczalnych - rys. 6.5.

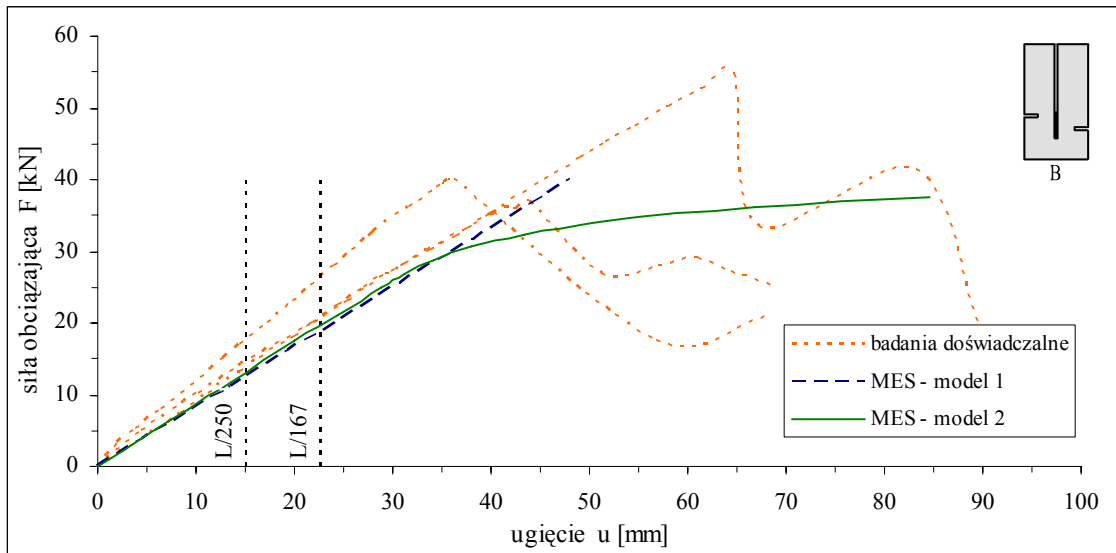
Model 2 ze względu na badany przypadek wytrzymałościowy - zginanie, w którym wpływ odkształceń plastycznych jest mniejszy niż w przypadkach gdzie występują strefy docisku (np. ściskanie w połączeniach prętów drewnianych konstrukcji drewnianych, [124]) wydaje się być modelem niedoskonałym. O ile w przypadku belki A oraz F uzyskano dobrą korelację z wynikami doświadczalnymi, o tyle w przypadku modeli z wklejonymi pionowo taśmami zbyt szybko następowało wyczerpanie nośności belki. Model zakłada uplastycznienie strefy rozciąganej (rys. 6.2) co w rzeczywistości nie ma miejsca. W dalszych badaniach numerycznych należałoby stworzyć model uwzględniający kruche pęknięcie drewna w strefie rozciąganej.



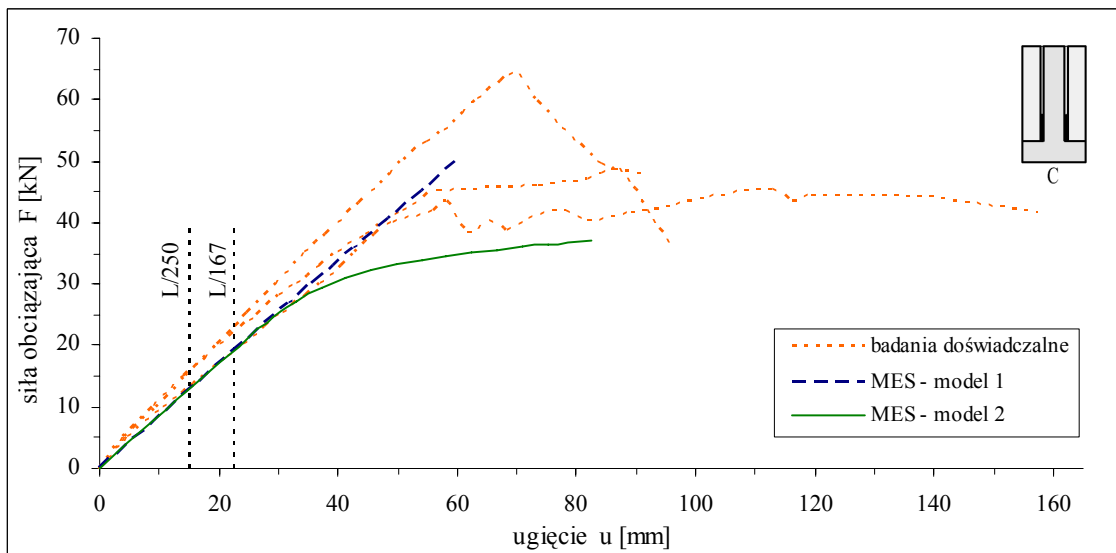
Rys. 6.4. Zależność „F-u” dla modeli doświadczalnych i badań numerycznych, belka A



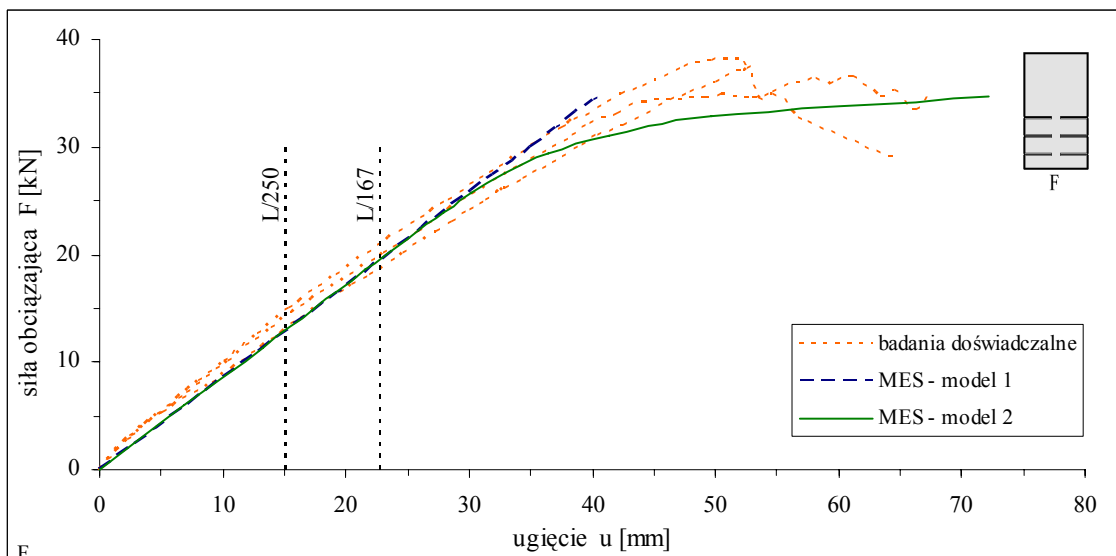
Rys. 6.5. Wykres naprężeń normalnych w drewnie w belce A, siła $F = 25 \text{ kN}$



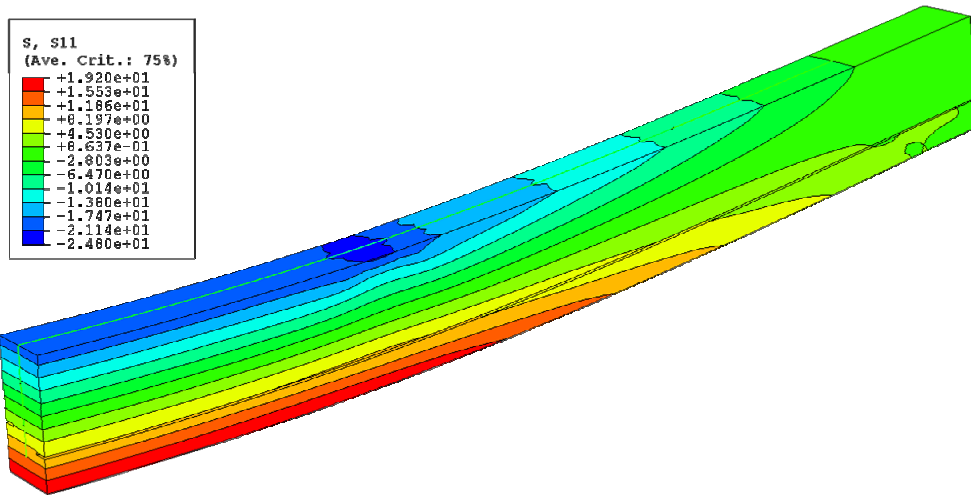
Rys. 6.6. Zależność „F-u” dla modeli doświadczalnych i badań numerycznych, belka B



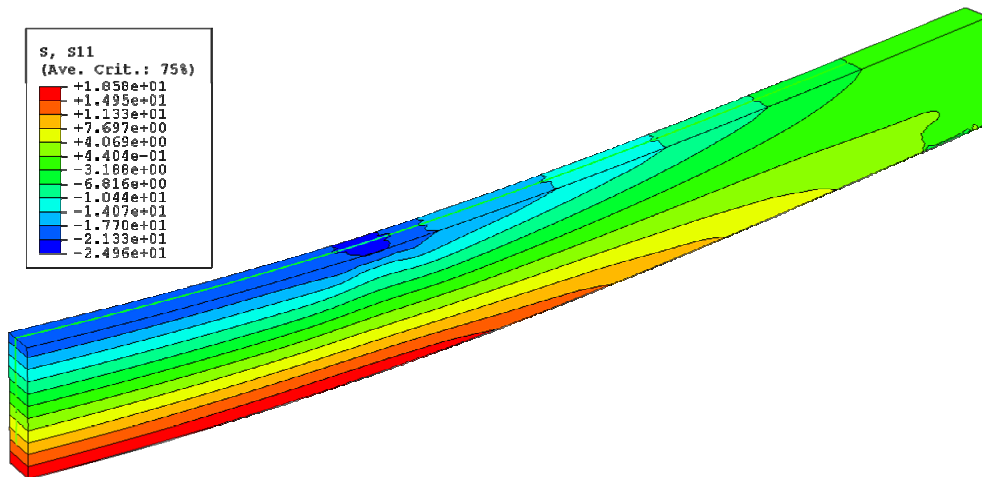
Rys. 6.7. Zależność „F-u” dla modeli doświadczalnych i badań numerycznych, belka C



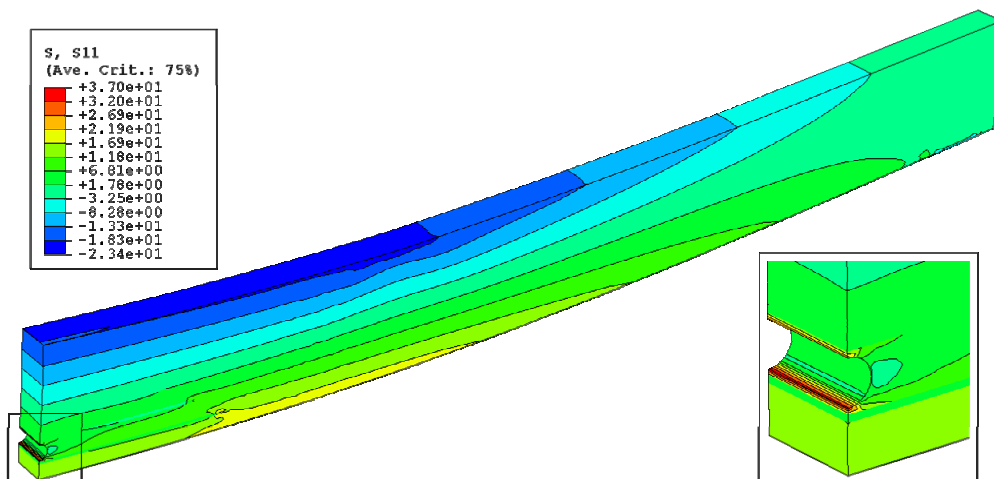
Rys. 6.8. Zależność „F-u” dla modeli doświadczalnych i badań numerycznych, belka F



Rys. 6.9. Mapa naprężeń normalnych σ_x w belce B, siła $F=30$ kN (model 1)

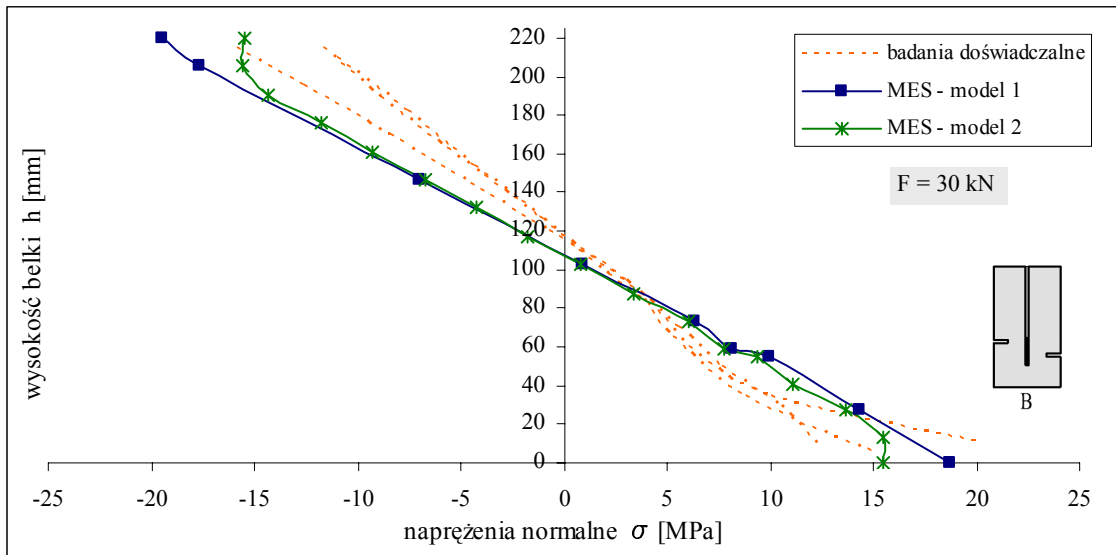


Rys. 6.10. Mapa naprężeń normalnych σ_x w belce C, siła $F=30$ kN (model 1)

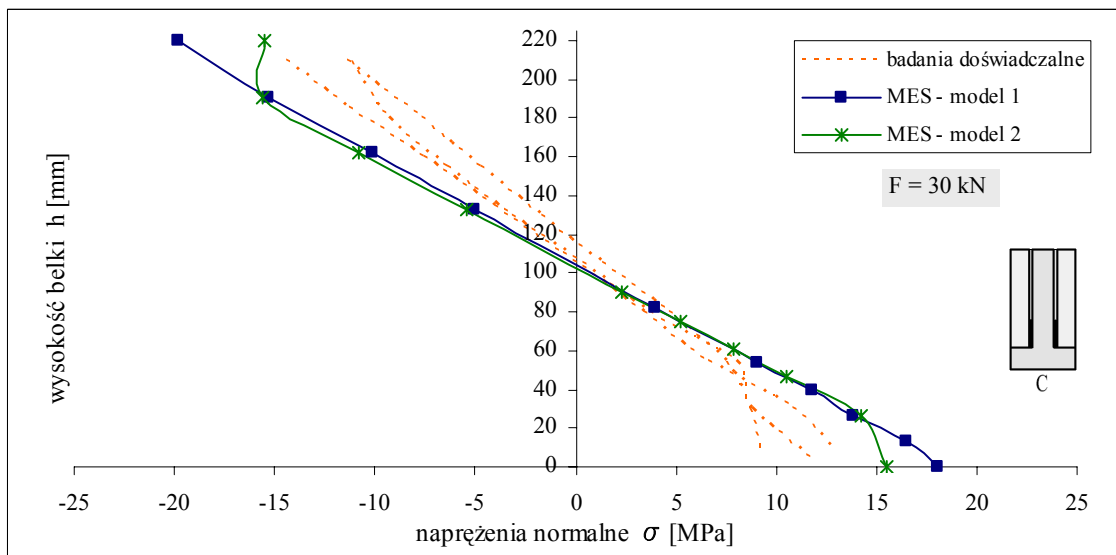


Rys. 6.11. Mapa naprężeń normalnych σ_x w belce F, siła $F=30$ kN (model 1)

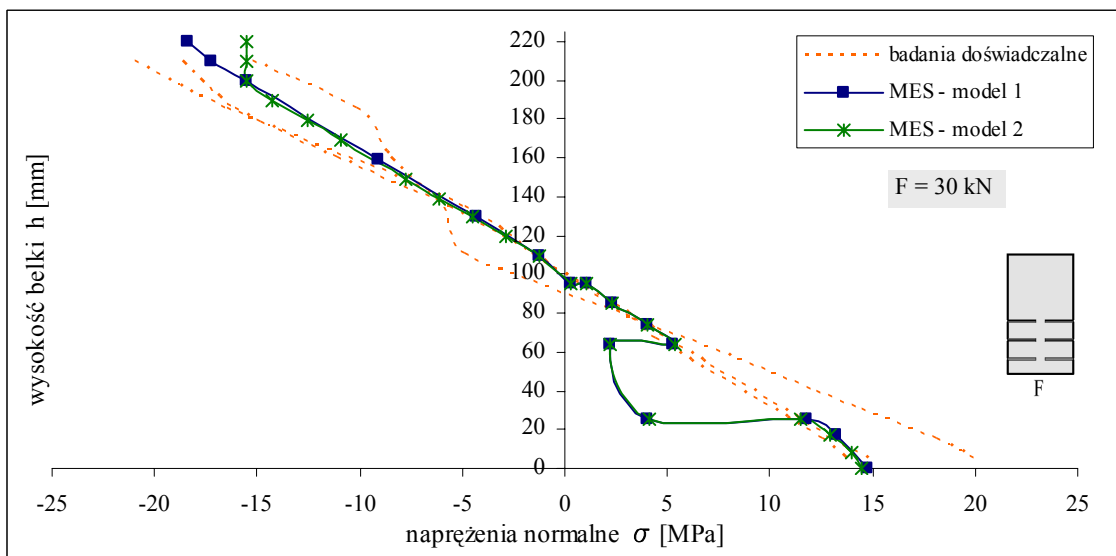
Bardzo dobrą korelację, w zakresie naprężeń normalnych w drewnie σ_x , uzyskano dla belki F - rys. 6.11, 6.14. Ponadto rozkład naprężeń uzyskany w analizie numerycznej (rys. 6.14) ma podobny charakter do rozkładu odkształceń uzyskanego w badaniach elastooptycznych (rozdz. 4.4.7) - „pik” na wysokości wkładek CFRP, czego nie widać wykresach odkształceń otrzymanych w oparciu o wskazania tensometrów elektrooporowych (rozdz. 4.3.7).



Rys. 6.12. Wykres naprężeń normalnych w drewnie w belce B, siła $F = 30$ kN



Rys. 6.13. Wykres naprężeń normalnych w drewnie w belce C, siła $F = 30$ kN



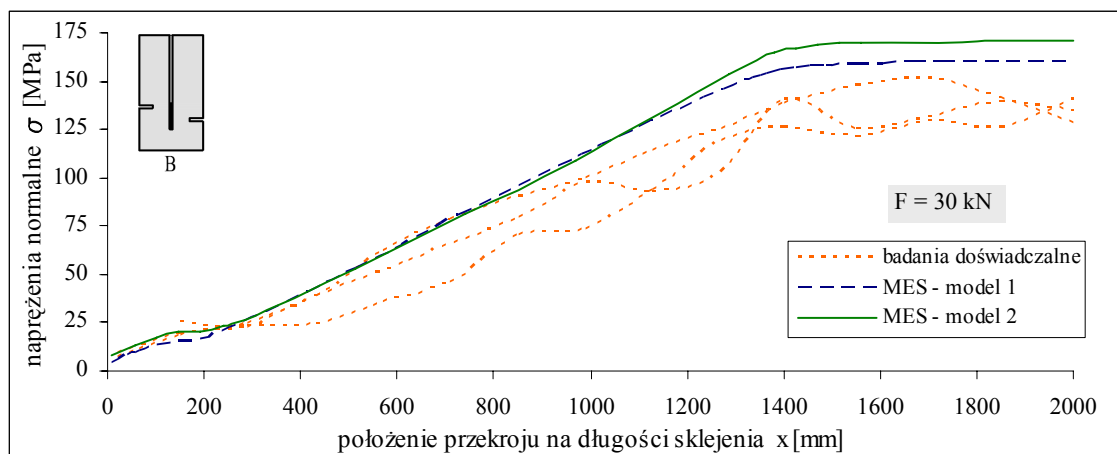
Rys. 6.14. Wykres naprężeń normalnych w drewnie w belce F, siła $F = 30$ kN

Największe wartości naprężeń normalnych w taśmach w belkach B i C zestawiono w tab. 6.6. Na rys. 6.15 i 6.16 przedstawiono porównanie rozkładów naprężeń normalnych na połowie długości taśmy. Zarówno w belce B jak i C wartości z analizy numerycznej są wyższe od uzyskanych w badaniach doświadczalnych. Wyraźna różnica widoczna jest przede wszystkim w modelu 2, uwzględniającym kryterium plastyczności drewna. W zakresie sprężystej pracy drewna różnice są stosunkowo niewielkie, nie przekraczają 15%.

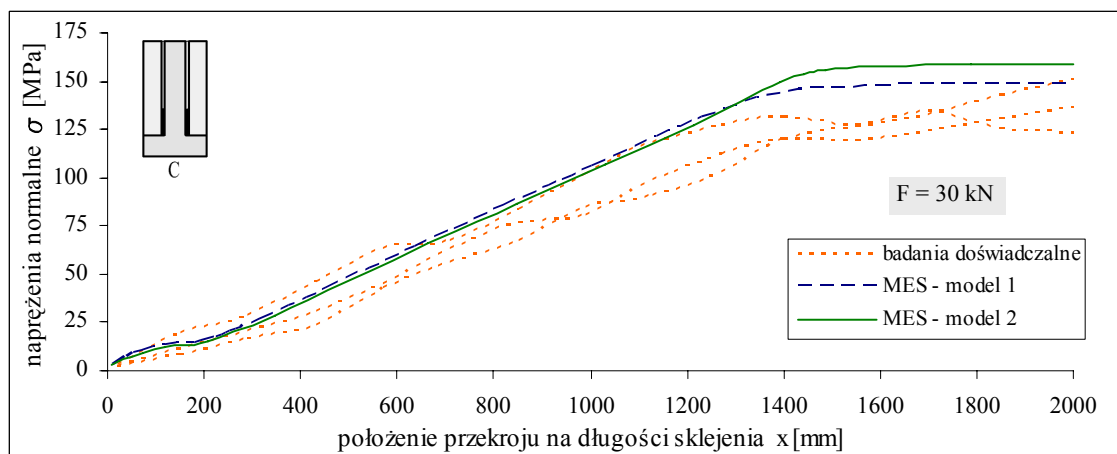
W włóknach skrajnych (dolnych) taśmy CFRP wartości naprężeń normalnych są wyższe o ok. 60% od wartości naprężeń w środku taśmy, zestawionych w tab. 6.6.

Tab. 6.6. Wartości maksymalnych naprężeń normalnych w taśmach w belkach B i C, siła $F=30\text{ kN}$

Belka	Naprężenia normalne w taśmie σ_x [MPa]		
	badania	MES model 1	MES model 2
B1	140,9		
B2	152,0	159,9	170,8
B3	139,7		
C1	136,7		
C2	134,7	148,7	158,3
C3	150,4		

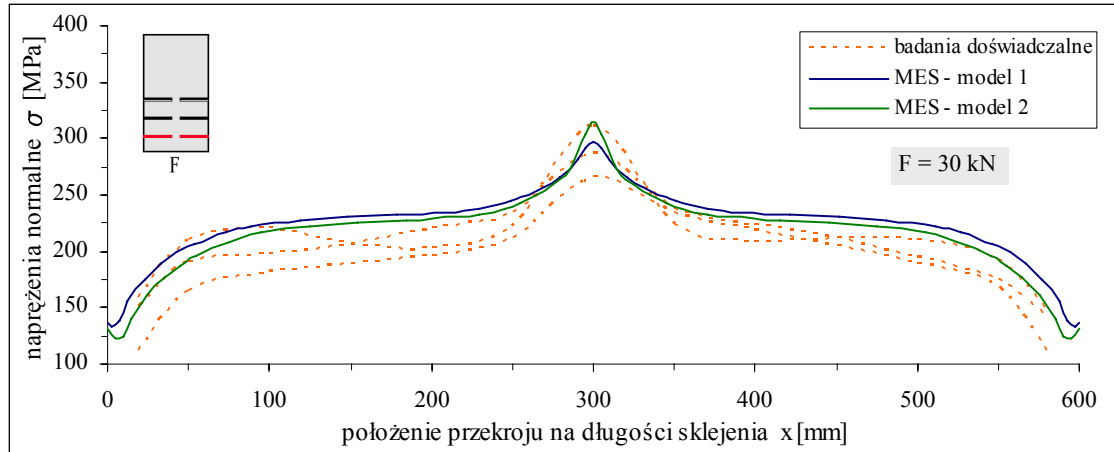


Rys. 6.15. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych w taśmie w belce B wg badań laboratoryjnych i numerycznych, $F= 30\text{ kN}$



Rys. 6.16. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych w taśmie w belce C wg badań laboratoryjnych i numerycznych, $F= 30\text{ kN}$

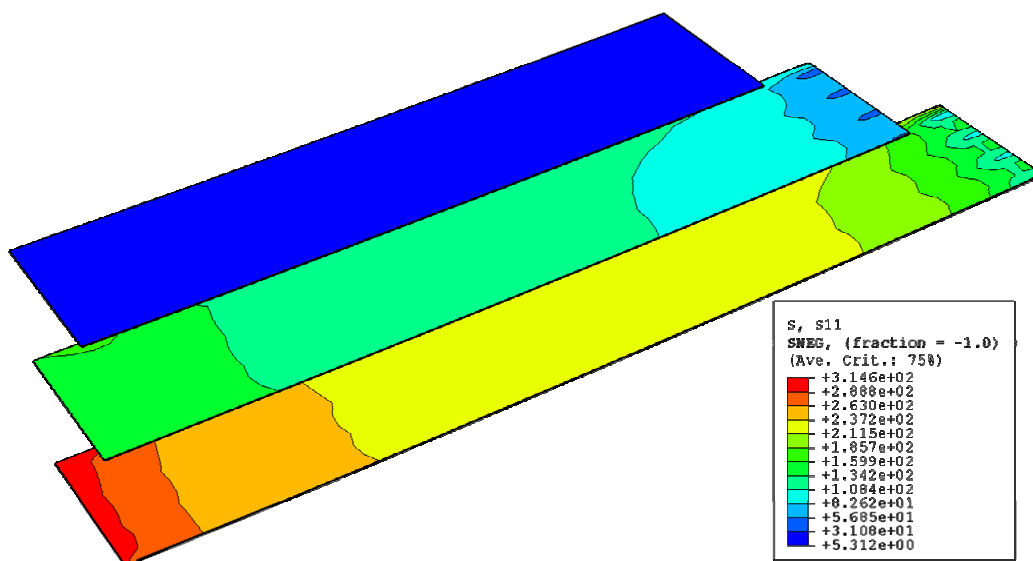
Na rys. 6.17. przedstawiono wykresy naprężeń normalnych z badań laboratoryjnych oraz analizy numerycznej w dolnej taśmie belki F, zaś w tab. 6.7 zestawiono maksymalne wartości naprężeń dla wszystkich trzech taśm. Uwzględnienie warstwy kleju spowodowało przyrost naprężeń normalnych w taśmie dolnej. W przeprowadzonej wcześniej analizie, bez modelowania warstwy kleju, maksymalne wartości naprężeń w taśmie dolnej były niższe o ok. 6%, [114].



Rys. 6.17. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych w dolnej taśmie w belce F wg badań laboratoryjnych i numerycznych, $F=30\text{ kN}$

Tab. 6.7. Wartości maksymalnych naprężeń normalnych w taśmach w belce F, siła $F=30\text{ kN}$

	belka F1	belka F2	belka F3	MES model 1	MES model 2
napr. normalne σ_x [MPa] w taśmie dolnej	310,5	282,3	286,1	297,7	315,3
napr. normalne σ_x [MPa] w taśmie środkowej	172,2	151,2	168,6	143,1	145,2
napr. normalne σ_x [MPa] w taśmie górnej	47,4	9,7	17,5	14,6	14,9



Rys. 6.18. Mapa naprężeń normalnych w taśmach w belce F, siła $F=30\text{ kN}$ (model 1)

Wartości naprężeń w taśmie (tab. 6.7) nie różnią się znacząco od siebie oraz są zgodne z wynikami analizy numerycznej, zarówno z modelem 1 jak i 2. Wyższe wartości naprężeń normalnych w taśmie środkowej dla trzech badanych belek może wynikać z popełnionego błędu technologicznego - innym niż teoretyczne usytuowaniem (taśmy zostały niżej wklejone, bliżej strefy rozciąganej belki). Wartości naprężeń w taśmie mają nieco wyższą wartość w włóknach skrajnych, tych w głębi przekroju. Różnice te są jednak nieznaczne i nie przekraczają 10% - rys. 6.18.

Na podstawie rys. 6.17 można stwierdzić, co potwierdzają również wyniki badań laboratoryjnych, że na końcach taśm następuje spiętrzenie naprężeń stycznych.

Charakter rozkładów naprężeń normalnych w taśmach z badań wszystkich analizowanych belek odpowiada wynikom z analizy numerycznej.

6.6. WNIOSKI Z ANALIZY NUMERYCZNEJ

Modelowanie drewna numerycznie jest w pewnym stopniu zagadnieniem uproszczonym, traktującym drewno jako materiał ortotropowy, homogeniczny (jednorodny). W rzeczywistości drewno jest materiałem anizotropowym, bardzo niejednorodnym. Niejednorodności drewna występują co najmniej na dwóch poziomach: w skali „mikro” są to słoje, a w skali „makro” są to sęki. Sęki, zwłaszcza chore lub wyschnięte, są imperfekcją materiałową - poważną wadą materiału konstrukcyjnego. W tym przypadku trudno mówić o dyskretyzacji ciągłego pola losowych właściwości materiału, ponieważ występuje naturalna, powszechnie znana i dobrze widoczna dyskretyzacja budowy materiału i jego właściwości, [39].

Założenie, że drewno jest materiałem homogenicznym jest uproszczeniem, uwzględniającym wszelkie wspomniane wady materiałowe drewna w sposób uśredniony. W belkach zginanych obecność wad materiałowych drewna w strefie rozciąganej jest szczególnie istotna. Analiza drewna (w skali technicznej, drewna budowlanego) jako materiału anizotropowego jest praktycznie niemożliwa – orientacja osi y i z jest prawie zawsze wykluczona. Przyjęcie zaś drewna jako materiału izotropowego jest zbyt dużym uproszczeniem - rozdz. 6.3. Traktowanie drewna jednak jako materiału ortotropowego jest wystarczającym przybliżeniem dla analizy numerycznej.

Analiza numeryczna, podobnie jak model analityczny (rozdz. 5.1), wykazała nieco mniejsze zwiększenie sztywności modeli wzmocnionych niż w badaniach doświadczalnych. Jedynie dla belki F uzyskano dobrą zgodność zależności „ $F-u$ ” zarówno dla sprężystej jak i sprężysto-plastycznej pracy drewna.

W zakresie sprężystym w przeprowadzonej analizie uzyskano dobrą zgodność ścieżek równowagi z wynikami laboratoryjnymi. Kryterium anizotropowej plastyczności Hilla nie jest kryterium doskonałym dla drewna. Niezbędne są dalsze prace nad odpowiednią hipotezą wytrzymałościową, która dobrze opisywałaby pracę drewnianych elementów zginanych.

W analizie uzyskano dobrą zgodność (jakościową i ilościową) rozkładów naprężeń normalnych w taśmie i nieco gorszą w drewnie z wynikami badań.

Wyniki analizy potwierdzają wnioski z badań laboratoryjnych o niskim stopniu wykorzystania wkładek wzmocniających (taśm CFRP) umieszczonych wewnątrz przekroju w układzie pionowym. Przekrój taśmy zostaje wykorzystany w większym stopniu po uplastycznieniu przekroju drewna.

7. PODSUMOWANIE

Rozprawa ma charakter badawczy z elementami teoretycznymi, opartymi o modelowanie analityczne i numeryczne, weryfikującymi wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych. Głównym zagadnieniem podjętym w pracy jest analiza deformacji i nośności przekrojów zginanych z drewna litego wzmocnionych przy użyciu taśm CFRP z zastosowaniem spoiny klejowej jako łącznika pomiędzy przekrojem drewnianym a wkładką wzmacniającą.

Badania przeprowadzone zostały na modelach w skali technicznej. „Zbrojenie” w postaci taśm CFRP umieszczano wewnątrz przekroju co stanowi o oryginalności badań a równocześnie czyni to rozwiązanie przydatnym w konserwacji konstrukcyjnej drewnianych konstrukcji historycznych. Stwierdzono, że wzmocnianie elementów zginanych taśmami CFRP wpływa korzystnie na nośność i sztywność. Wklejenie w przekrój belki taśm węglowych w znacznym stopniu ograniczyło wpływ nierównomierności usłojenia i inkluzji na nośność belki oraz postać jej zniszczenia.

Obok tradycyjnych metod pomiarowych (czujniki elektrooporowe i indukcyjne) do pomiaru odkształceń przekrojów wzmocnionych (zespolonych) podjęto próbę zastosowania metody elastoptycznej warstwy powierzchniowej. Dotychczas nie opisano takiej próby w literaturze przedmiotu. Metoda wymaga przeprowadzenia dalszych badań, mających na celu weryfikację zgodności z pomiarami metodami tradycyjnymi.

W programie, obok wyników badań laboratoryjnych i sformułowanych na ich podstawie wniosków, zbudowano oryginalny model analityczny. Badania doświadczalne potwierdzają słabo nieliniową pracę materiału do wyczerpania nośności. Wynik analizy uzależniony jest od danych (wyników badań – odkształceń i siły obciążającej - momentu zginającego) Odkształcenia i moment definiują związek konstytutywny przy założeniu, że spełniony jest warunek równowagi momentów. Badania całego elementu umożliwiają odtworzenie uśrednionego związku konstytutywnego dla przekroju belki drewnianej w zakresie słabo nieliniowej pracy materiału. W praktyce nie ma wyselekcjonowanego drewna, pomimo metod sortowania, natomiast uzyskanie niezłej zgodności dla drewna niewyselekcjonowanego (o różnym stopniu nasilenia wad drewna) pozwala przyjąć, że metoda może być stosowana w praktyce, gdzie również nie mamy do czynienia z drewnem wyselekcjonowanym. Zaproponowany model analityczny przy weryfikacji licznieszą próbą badanych elementów, może stanowić podstawę do stworzenia inżynierskiego algorytmu szacowania nośności zginanych belek wzmocnionych przy użyciu CFRP.

Ponadto przedstawiono analizę pracy statycznej przekrojów wzmocnionych przeprowadzoną w oparciu o modelowanie numeryczne, bazując na metodzie elementów skończonych, z wykorzystaniem kryterium Hilla, pozwalającym uwzględnić granice plastyczności w różnych kierunkach. Wykonywanie analiz komputerowych z wykorzystaniem MES elementów konstrukcji drewnianych, pozwala dokładniej poznać rozkłady naprężeń wewnątrz rozpatrywanych przekrojów. Trzeba pamiętać jednak o tym, że wykorzystanie MES dla elementów z drewna litego jest obarczone znacznymi uproszczeniami wynikającymi z naturalnej budowy drewna oraz przypadkowym, trudno przewidywalnym, rozkładem wad drewna, szczególnie sęków i skręceń włókien.

LITERATURA

- [1] ABAQUS Version 6.5 Documentation, Analysis User's Manual, vol. I-VI.
- [2] Ajdukiewicz A., Brol J.: *Modern strengthening methods of old timber structures*. Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, August 29-31, 2001, CD rom.
- [3] Ajdukiewicz A., Brol J., Malczyk A. Właszczuk M: *Na ratunek gliwickiej wieży*. Murator Plus, nr 1 (13), styczeń 2000, s. 58-60.
- [4] Ajdukiewicz A., Brol J., Malczyk A. Właszczuk M: *O zagrożeniach i wzmocnieniach najwyższej w świecie zabytkowej wieży drewnianej*. XIX Konferencja Naukowo-Techniczna: Awaryjne Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 19-22 maja 1999, t.1, s.195-202.
- [5] Ajdukiewicz A., Brol J., Malczyk A. Właszczuk M: *Rehabilitation of the Highest Wooden Tower in Poland*. Structural Engineering International, Vol.10, No 3, August 2000; s.161-163.
- [6] Akbiyik A., Lamanna A.J., Hale W.M.: *Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits*. Construction and Building Materials, 21, 2007, s. 991-1000.
- [7] Aleksandrov A.J., Achmetzianov M.N.: *Polarizacionno-optičeskie metody mekhaniki deformirujemogo tiela*. Izd. Nauka, Moskwa, 1973.
- [8] Allbones C.: *Composites repair wooden mast*. Reinforced Plastics Volume: 48, November, 2004, s. 36-39.
- [9] André A.: *Fibres for strengthening of timber structures*. Research report, Luleå University of Technology, Nr 2006:03.
- [10] ASTM D 3039/D 30339M-95a. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. Annual Book of Standards, vol. 14.02, 1995.
- [11] Bainbridge R., Mettem C., Harvey K., Ansell M.: *Bonded-in rod connections for timber structures-development of design methods and test observations*. International Journal of Adhesion and Adhesives Vol. 22, Issue 1, 2002, s. 47-59.
- [12] Bajon-Romańska M.: *Uwagi o stanie badań nad zabytkowymi konstrukcjami drewnianymi w Polsce*. V Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, 17-18 maja 2002, s. 283-288.
- [13] Balsamo A., Cerone M., Viskovic A.: *New Wooden Structures with Composite Material Reinforcements for Historical Buildings. The Case of the Arena Flooring in the Colosseum*. Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, August 29-31, 2001, CD rom.
- [14] Becker S., Rippin T.: *Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für Verbundquerschnitte aus Brettschichtholz und faserverstärkten Kunststoffen*. Diplomarbeit, FH Wiesbaden, 1999.
- [15] Bergmeister K., Luggin W.: *Innovative strengthening of timber structures using carbon fibers*. Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, August 29-31, 2001, CD rom.
- [16] Będziński R., Gomoliński P., Jankowski L., Szlagowski J.: *Analiza doświadczalna metodami optycznymi elementów konstrukcji kształtowania kryterium nośności granicznej*. Wydawnictwo MET, Warszawa, 1996.
- [17] Blass H. J., Romani M.: *Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen*. In: Holz als Roh- und Werkstoff 59, 2001, s. 364-373.
- [18] Blass H.J., Romani M.: *Biegezugverstärkung von BS-Holz mit CFK- und AFK-Lamellen*. Bautechnik 79, 2002, s. 364-373.
- [19] Blass H.J., Romani M.: *Design model for FRP reinforced glulam beams*. International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Working Commission W18-Timber Structures, Venice 2001, paper CIB-W18/34-12-3.
- [20] Blass H.J., Romani M.: *Reinforcement of glulam beams with FRP reinforcement*. Bauen mit Textilien, Heft 4/2001, Ernst & Sohn, 2001.

- [21] Bob L., Gruin A., Kiss L.: *Alternative Reinforcements of Wooden Beams*. Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, August 29-31, 2001, CD rom.
- [22] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: *Kompozyty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [23] Bodig J., Jayne B.A.: *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
- [24] Bogacz W., Lis Z., Łodygowski T., Rapp P.: *Wzmocnianie belek drewnianych za pomocą zbrojenia rozproszonego z włókien węglowych*. VI Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 289-299.
- [25] Borchardt, J. K.: *Reinforced plastics help preserve historic buildings*. Reinforced Plastics Volume: 47, December 2003, s. 30-32.
- [26] Borri A, Corradi M., Grazini A.: *FRP reinforcement of wood elements under bending loads*. 10th Inter. Conf., Structural Faults + Repair, London, 2003, CD rom.
- [27] Borri A, Corradi M., Speranzini E.: *Travi in legno rinforzate con barre o con tessuti in fibra di carbonio*. L'edilizia, n 4, 2001, s. 48-56.
- [28] Borri A., Corradi M., Grazini A.: *A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials*. Composites Part B: Engineering Volume: 36, 2005, s. 143-153.
- [29] Borri A., Corradi M.: *Rinforzo di travi lignee con elementi poltrusi In FRP*. Atti del II Convegno Nazionale Mechanics of Masonry Structures strengthened with FRP Materials: Modeling, Testing, Design, Venezia, 6-8 Dicembre 2004, s. 319-330.
- [30] Brol J.: *Analiza doświadczalnie teoretyczna wzmocnienia konstrukcji drewnianych kompozytami polimerowo-węglowymi*. Rozprawa doktorska, Gliwice, 2005.
- [31] Brol J.: *Skuteczność wzmocnienia belek drewnianych taśmami CFRP*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006, s. 91-98.
- [32] Brol J.: *Wzmocnianie elementów drewnianych taśmami lub matami z włókien węglowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, z. 93, Gliwice 2001, s. 67-76.
- [33] Brol J.: *Wzmocnianie słupów drewnianych materiałami CFRP*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006, s. 99-106.
- [34] Brol J.: *Wzmocnianie stropów drewnianych taśmami z włókien węglowych*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 301-308.
- [35] Brol J.: *Wzmocnianie zespolonych stropów drewniano-żelbetowych polimerami zbrojonymi włóknami węglowymi*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, z. 95, Gliwice, 2002, s.105-113.
- [36] Broughton J.G., Hutchinson A.R.: *Adhesive systems for structural connections in timber*. International Journal of Adhesion and Adhesives Volume: 21, 2001, s. 177-186.
- [37] Brunner M., Schnueriger M.: *Timber Beams Strengthened by Attaching Prestressed Carbon FRP Laminates with a Gradianted Anchoring Device*. Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, Hong Kong, China, December 7-9, 2005, s. 465-471.
- [38] Brunner M., Schnueriger M.: *Timber beams strengthened with prestressed fibres: Delamination*. 8-th World Conference on Timber Engineering, Volume I, Lahti, Finland, June 14-17, 2004, s. 345-350.
- [39] Brząkała W.: *Probabilistyczny model dyskretnej imperfekcji materiałowych*. Zastosowanie mechaniki w budownictwie lądowym i wodnym. Pod. red. J. Kazimierza Szmidta. Wyd. IBW PAN, Gdańsk 2001, s. 27-34.
- [40] Carolin A.: *Carbon Fibres Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements*. Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2003:18.

- [41] Chen C.J., Lee T.L., Jeng D.S.: *Finite element modeling for the mechanical behavior of dowel-type timber joints*. Computers and Structures, Vol. 81, n 30-31, 2003, s. 2731-2738.
- [42] Chung D.D.L.: *Composite materials: functional materials for modern technologies*. Springer-Verlag, London, 2004.
- [43] Ciabach J.: *Żywice i tworzywa sztuczne stosowane w konserwacji zabytków*. Wydawnictwo Uniwersytetu M. Kopernika, Toruń, 1998.
- [44] Claisse P.A., Davis T.J.: *High performance jointing systems for timber*. Construction and Buildings Materials vol. 12 (8), 1998, s. 415-425.
- [45] CNR DT 200/2004. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. 2004.
- [46] CNR DT 201/2005. *Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni relative a Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati*. 2005.
- [47] CNR DT 206/2006. *Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno*. (Sottoposto ad inchiesta pubblica), 2006.
- [48] Cook R. A.: *Behavior of Chemically Bonded Anchors*. Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 9, September 1993, s. 2744-2762.
- [49] Crews K., Greenland A, Bakkos S.: *Application of advanced Fibre Reinforcement Plastic composites to structural timber*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 716-717.
- [50] Cruz H., Custódio J., Smedley D.: *Bond repair of cracked beams*. High Performance Structures and Materials. III WIT Transactions on The Built Environment, Vol 85, WIT Press 2006.
- [51] Dagher H.J., Breton J.: *Creep behavior of FRP-reinforced glulam beams*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 161-168.
- [52] Dagher H.J., Lindyberg R., Abdel-Magid B.: *Three FRP-reinforced glulam demonstration projects in the USA*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 848-849.
- [53] Dally J.W., Riley W.F.: *Experimental Stress Analysis*. McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [54] Davids W.G., Richie M., Gamache C.: *Fatigue of glulam beams with fiber-reinforced polymer tension reinforcing*. Forest Products Journal, Vol. 55, No. 1, January 2005, s. 93-101.
- [55] Dąbrowski H.: *Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknistych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [56] De Lorenzis L., Scialpi V., Tegola A.L.: *Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber*. Composites, Part B, Vol. 36, Issue 4, June, 2005, s. 279-289.
- [57] De Moura M.F.S.F., Silva M.A.L., de Morais A.B., Morais J.J.L.: *Equivalent Crack Based Mode II Fracture Characterization of Wood*. Engineering Fracture Mechanics, n 73, 2006, s. 978-993.
- [58] Demers C.E.: *Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites*. Construction and Building Materials Volume: 12, July 1, 1998, s. 311-318.
- [59] Derkowski W.: *Wzmacnianie materiałami CFRP zginanych belek żelbetowych poddanych obciążeniom zmęczeniowym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, z. 95, Gliwice 2002, s. 125-134.
- [60] Drwal G., Grzymkowski R., Kapusta A., Słota D.: *Mathematica 4*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2000.
- [61] Dziarnowski Z., Michniewicz W.: *Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych*. Arkady, Warszawa, 1974.
- [62] Edwards K.L.: *An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes*. Materials and Design Volume: 19, February 1, 1998, s. 1-10.

- [63] Ehsani M., Larsen M., Palmer N.: *FRP Laminates and Epoxy Help Support New Loads in an Existing Wooden Gymnasium*. Structure Magazine, February 2004, s. 19-21.
- [64] ENV 1995-1-2 Eurocode 5. *Design of timber structures. Structural fire design*.
- [65] Fiorelli J., Alves Dias A.: *Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber*. Materials Research, Vol. 6, No. 2, 2003, s. 193-202.
- [66] Flaga, K.: *Advances in materials applied in civil engineering*. Journal of Materials Processing Technology Vol. 106, October 31, 2000, s. 173-183.
- [67] Galloway T.L. Fogstad C., Dolan C.W., Puckett J.A.: *Initial Tests of Kevlar Prestressed Timber Beams*. National Conference on Wood Transportation Structures, October 23-25, 1996, s. 215-224.
- [68] Ganowicz R., Guzenda R.: *Destrukcyjny wpływ zmian wilgotności otoczenia na drewniane warstwowo klejone konstrukcje*. Sympozjum Naukowe. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 5-6 września 1996, s. 73-80.
- [69] Ganowicz R., Latusek D.: *Wstępne sprężanie konstrukcji drewnianych*. Sympozjum na temat: Badania nad zastosowaniem drewna i materiałów drewnopochodnych we współczesnych konstrukcjach budowlanych. Szczecin, czerwiec 1978, s. 281-291.
- [70] Ganowicz R., Plenzler R.: *Zbrojone stalą belki drewniane - badania i realizacja obiektu prototypowego*. Sympozjum nt. Badania nad zastosowaniem drewna i materiałów drewnopochodnych we współczesnych konstrukcjach budowlanych. Szczecin, czerwiec 1978, s. 271-279.
- [71] Garbarski J.: *Materiały i kompozyty niemetalowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.
- [72] Garden H.: *Use of composites in civil engineering infrastructure*. Reinforced Plastics, Vol. 45, Number 7, July 2001, s. 44-48, 50.
- [73] German J.: *Materiały kompozytowe w budownictwie*. Kalejdoskop Budowlany, 6/2000, s.14-17.
- [74] German J.: *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*. Skrypt Politechniki Krakowskiej. Kraków 1996.
- [75] Gil Z.: *Zbrojenie elementów drewnianych za pomocą stalowych prętów spiralnych*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006, s. 133-138.
- [76] Gil Z., Fanderejska E.: *Wzmocnienie konstrukcji drewnianych za pomocą prętów spiralnych*. XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Zamek Kliczków, 9-11 grudnia 2004, s. 153-160.
- [77] Godycki-Ćwirko T., Pawlica J.: *Renowacja starych stropów drewnianych*. Przegląd Budowlany 2/97, s.12-14, 22.
- [78] Gogolin M.R., Wilczyński A.: *Naprawy zabytkowych konstrukcji drewnianych, ewolucja metod*. Sympozjum Naukowe. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 5-6 września 1996, s. 81-88.
- [79] Goldstein E. W.: *Timber construction for architects and builders*. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [80] Greenland A., Crews K., Bakkos S.: *Enhancing timber structures with advanced Fibre Reinforced Plastic composite reinforcements*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, 1998, s. 608-615.
- [81] Grosse M., Rautenstrauch K., Schlegel R.: *Numerische Modellierung von Holz und Verbindungselementen in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen*. Bautechnik 82, Heft 6, 2005, s. 355-364.
- [82] Guan Z.W.: *Structural behaviour of glued bolt joints using FRP*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 265-272.

- [83] Guan Z.W., Rodd P.D., Pope D.J.: *Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP*. Computers and Structures, Volume: 83, November, 2005, s. 2476-2487.
- [84] Gustafsson, P.J., Serrano, E.: *Predicting the pull-out strength of glued-in rods*. World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, July 31-August 3, 2000, poz. 7.4.4.
- [85] Harris B.: *Engineering composite materials*. IOM Communications, London, 1999.
- [86] Herzog T., Natterer J., Schweitzer R. i in.: *Holzbau Atlas*. Birkhäuser, Edition Detail, München, 2003.
- [87] Hesin G.L.: *Metod fotouprugosti*. Strojizdat, Moskva, 1975.
- [88] Hill R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. The Clarendon press, Oxford, 1950.
- [89] Hollaway, L.C.: *The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure*. Construction and Building Materials, Volume: 17, September-October, 2003, s. 365-378.
- [90] Holmberg, S., Persson K., Petersson H.: *Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials*. Computers & Structures, Volume: 72, August 9, 1999, s. 459-480.
- [91] Holz. D.: *Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz - einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse*. Holztechnologie 22, 1981, s. 80-85.
- [92] <http://www.armalam.it>
- [93] <http://www.empa.ch>
- [94] <http://www.sika.com>
- [95] <http://www.sp-reinforcement.eu>
- [96] Humphreys M.F., Francey K.L.: *An investigation into the rehabilitation of timber structures with fibre composite materials*. In Deeks A.J., Hao H. Eds. *Proceedings Developments in Mechanics of Structures and Materials*, Perth, Australia, 2004, s. 1317-1322.
- [97] ICOMOS - Miedzynarodowa Rada ds. Pomników i Miast. *Zalecenia odnośnie do analizy, konserwacji i renowacji konstrukcyjnej dziedzictwa architektonicznego*. XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Zamek Kliczków, 9-11 grudnia 2004, s. 449-463.
- [98] ISIS Canada. *Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, Manual 3*. ISIS Canada Corporation, Winnipeg, Canada, 2001.
- [99] Issa C.A., Kmeid Z.: *Advanced wood engineering: glulam beams*. Construction and Building Materials, Volume: 19, March, 2005, s. 99-106.
- [100] Iwanow W.A.: *Dieriewiannyje konstrukcii*. Gosudarstwennoje Izdatielstwo Litieratury po Stroitelstwie i Architekturie, Leningrad, 1956.
- [101] Iwanow W.A.: *Konstrukcii iz dieriewa i plastmas*. Wiszcza Szkoła, Kijów 1981.
- [102] Janik P.: *Możliwości ograniczania zagrożenia pożarowego w budynkach o konstrukcji drewnianej*. II Ogólnopolska Konferencja pt. Architektura ryglowa - wspólne dziedzictwo, Szczecin 1999, s. 83-88.
- [103] Jankowski L.J., Styś D.: *Strefa mikrozarzysowania w otoczeniu szczeliny w elementach betonowych badanych metod elastooptycznej warstwy powierzchniowej*. Arch. Inż. Łądowej, XXXII t., z.2/1986.
- [104] Janowski. Z., Karczmarczyk S.: *Zabytkowe stropy drewniane - konserwacja konstrukcji*. V Konferencja Naukowo-Techniczna. Inżynieryjne problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 17-19 maja 2000, s. 109-125.
- [105] Jasięko J.: *Experimental investigation into the force distribution in glued steel bar and wood joints*. Archives of Civil Engineering, XLVIII, 1, 2002, s. 93-108.
- [106] Jasięko J.: *Force transmission between epoxy bonded steel bars and wood*. Report TUE-BKO-89.15, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1989.
- [107] Jasięko J.: *Glue joints for reinforcing the damaged ends of wooden beams*. Structural Engineering International, No. 4, 2001, s. 246-250.

- [108] Jasięko J.: *Naprawa i wzmocnianie zginanych belek drewnianych*. Materiały budowlane, 5/2000, s. 19-23, 26.
- [109] Jasięko J.: *On modeling the behaviour of glued steel bar-wood joints*. Archives of Civil Engineering, XLVIII, 2, 2002, s. 227-251.
- [110] Jasięko J.: *Opracowanie metod wzmocniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych, Etap I*. Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.
- [111] Jasięko J.: *Opracowanie metod wzmocniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych, Etap II*. Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
- [112] Jasięko J.: *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmocnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.
- [113] Jasięko J.: *Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmocnianiu zginanych belek drewnianych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [114] Jasięko J., Czepizak D., Nowak T.: *Wzmocnianie zginanych litych belek drewnianych taśmami CFRP*. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, DWE, Wrocław 2006, s. 208-217.
- [115] Jasięko J., Nowak T.: *Wzmocnianie zginanych belek drewnianych obiektów zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. V Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, 17-18 maja 2002, s. 189-196.
- [116] Jasięko J., Pietraszek P., Nowak T.: *Taśmy CFRP we wzmocnianiu elementów konstrukcyjnych z drewna*. VI Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 309-322.
- [117] Jasięko J., Pietraszek P.: *Koncepcja łączników mechano-klejowych dla konstrukcji drewnianych*. Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Świnoujście, 27-28 września 1999, s. 123-128.
- [118] Jasięko J., Rapp P., Nowak T.: *Numeryczne modelowanie rozkładów odkształceń i naprężeń w belkach z drewna litego wzmocnionych przy użyciu CFRP*. VII Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006, s. 145-152.
- [119] Jeruzal J., Kozłowska J., Szer J.: *Diagnostyka dźwigarów z drewna klejonego warstwowo*. IX Konferencja Naukowo-Teczniczna, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Szklarska Poręba 2000, s. 229-235.
- [120] Jeruzal J., Malinowski C., Kuś M.: *Belki drewniane wzmocniane nakładkami nie dochodzącymi do podpór – analiza teoretyczna*. Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Świnoujście, 27-28 września 1999, s. 41-50.
- [121] Kapkowski J., Słowikowska I., Stupnicki J.: *Badanie naprężeń metodą elastoptycznej warstwy powierzchniowej*. PWN, Warszawa, 1987.
- [122] Karbhari V.M., Zhao L.: *Use of composites for 21st century civil infrastructure*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Volume: 185, May 12, 2000, s. 433-454.
- [123] Karczmarczyk S., Mierzwa J.: *Trwałość zabytkowych konstrukcji drewnianych w warunkach eksploatacji przemysłowej*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna. Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 21-23 maja 1998, s. 135-144.
- [124] Kardysz M.: *Analiza połączeń stosowanych w drewnianych konstrukcjach zabytkowych*. Praca Magisterska Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [125] Kokociński W.: *Drewno. Pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych*. Prodruck, Poznań, 2004.
- [126] Kokociński W.: *Nieniszcząca metoda badania jakości drewna w konstrukcjach budowlanych*. Zeszyty Problemowe, Badania nieniszczące, Warszawa 2001, s. 231-236.

- [127] Kokociński W.: *Anatomia drewna*. Prodruk, Poznań, 2002.
- [128] Kowal Z.: *Delaminacyjna niestateczność powłok kompozytowych na elementach metalowych*. IX International Conference on Metal Structures, Kraków, 1995, s. 225-232.
- [129] Kowal Z.: *Wzmacnianie konstrukcji kompozytami włóknistymi* VII Konferencja Naukowo-Technicznej. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym, Wrocław-Szklarska Poręba, 1996, s.115-122.
- [130] Kozakiewicz P. Matejak M.: *Klimat a drewno zabytkowe*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
- [131] Kozarski P.: *Konserwacja domu*. Polskie Stowarzyszenie Mykologów Budownictwa, Wrocław, 1997.
- [132] Kozarski P.: *Ochrona drewna i innych materiałów przed korozją biologiczną*. Renowacje i zabytki 3/2006, s. 132-143.
- [133] Kram D.: *Problemy oceny odporności ogniowej konstrukcji drewnianych w świetle Eurokodu 1, Eurokodu 5 i PN-B 03150*. V Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, 17-18 maja 2002, s. 211-220.
- [134] Kram D., Stachowicz A.: *Ocena odporności ogniowej złożonych układów konstrukcyjnych z drewna klejonego*. Budownictwo ogólne, Zagadnienia Konstrukcyjne, materiałowe i ciepłno-wilgotnościowe w budownictwie. Wydawnictwa uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2003, s. 175-182.
- [135] Kropf F., Meierehofer U.: *Strengthening, Retrofitting and Upgrading of Timber Structures with High - Strength Fibres*. Structural Engineering International 3/2000, s. 178-181.
- [136] Krzysik F.: *Nauka o drewnie*. PWN, Warszawa 1978.
- [137] Lang W.: *Innovative Bewehrungen im Holzbau*. Diplomarbeit, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. BOKU Wien, 1998.
- [138] Lange M., Orłowicz R.: *Wybór materiałów do napraw konstrukcji drewnianych*. XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Zamek Kliczków, 9-11 grudnia 2004, s. 247-254.
- [139] Leda H.: *Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi. Wytwarzanie właściwości, stosowanie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [140] Leijten A.J.M.: *Balkkop restauratie met inglijmde staalplaten*. Rapport 25-87-8/5-LV-6, TU Delft, Netherlands, 1987.
- [141] Leijten A.J.M.: *Development of a general failure criterion for wood*. Rapport 25-87-17/9-HA-35, TU Delft, Netherlands, 1987.
- [142] Lewicki B.: *Ocena bezpieczeństwa konstrukcji budynków zabytkowych w świetle przepisów i ustaleń normowych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna, Inżynieryjne problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 17-19 maja 2000, s. 145-151.
- [143] Linan C. R., Rubio de Hita P., Gomez de Cozar J. C.: *Application of ultrasonic techniques, as a non destructive method, for the evaluation of timber structures*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 806-807.
- [144] Lis Z., Rapp P.: *Odtworzenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w belkach drewnianych za pomocą taśm węglowych*. V Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, 17-18 maja 2002, s. 221-228.
- [145] Luggin W., Bergmeister K.: *Carbon Fibre Reinforced and prestressed timber Beams*. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest. 1998, session 5/2.
- [146] Luke S.: *Composites gain ground in civil engineering*. Reinforced Plastics, Vol. 44, No.6, 2004, s. 34-35, 37, 39, 41-42.
- [147] Luke S., Skwarski A.: *Strengthening with carbon fibre plates*. Reinforced Plastics Volume: 42, March, 1998, s. 48-50.
- [148] Łagoda M.: *Możliwość wzmocniania konstrukcji mostowych sprężonymi taśmami kompozytowymi*. Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie Budowlane, Szczecin – Międzyzdroje, 2003 CD rom.

- [149] Łagoda M.: *Wzmocnianie mostów przez doklejanie elementów*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [150] Machnicki J.: *Taśmy węglowe CFRP we wzmocnianiu konstrukcji drewnianych*. Praca Magisterska Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [151] Makowski A.: *Impact of the type and shape of the CFRP composite reinforcement on the improvement of strength parameters of wood combined elements*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Wood Technology, Vol. 9, Issue 4. 2006.
- [152] Martin Z., Stith J., Tingley D.: *Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology*. Word Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, July 31- August 3, 2000, poz. P51.
- [153] Martin, Z., Tingley, D.A.: *Fire resistance of FRP reinforced glulam beams*. Word Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, July 31- August 3, 2000, poz. 2.2.2.
- [154] Masłowski E., Spiżewska D.: *Wzmocnianie konstrukcji budowlanych*. Arkady, Warszawa 2002.
- [155] Materiały informacyjne firmy SIKA, 2004.
- [156] Meier U.: *Composite Materials in Bridge Repair*. Applied Composite Materials, Volume: 7, May 2000, s. 75-94.
- [157] Meier U.: *Strengthening and stiffening of historic wooden structures with CFRP*. FRP Composites In Civil Engineering, Vol II, J.G. Teng, 2001, s. 967-974.
- [158] Meier, U: *Strengthening of structures using carbon fiber/epoxy composites*. Construction and Building Materials 9(6), 1995, s. 341-351.
- [159] Miedziałowski C., Malesza M.: *Budynki o szkielecie drewnianym z poszyciem, Podstawy mechaniki konstrukcji oraz zagadnienia konstruowania i realizacji*. 2006.
- [160] Mielczarek Z.: *Budownictwo drewniane*. Arkady, Warszawa 1994.
- [161] Mielczarek Z., Draškovič F.: *Efektywność wzmocnienia belek drewnianych materiałami wysokiej wytrzymałości*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006, s. 223-230.
- [162] Mielczarek Z., Kurtz K.: *Problemy konstrukcyjne w budownictwie zabytkowym*. II Ogólnopolska Konferencja pt. Architektura ryglowa - wspólne dziedzictwo, Szczecin 1999, s. 53-64.
- [163] Mielczarek Z., Orłowicz R.: *Uwagi do stosowania kompozytów włóknistych w konstrukcjach drewnianych*. VI Konferencja Naukowa, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 333-344.
- [164] Mielczarek Z., Śliwka K.: *Wzmocnianie belek stropowych oraz dźwigarów dachowych układami zewnętrznych ciągów stalowych*. IX Konferencja Naukowo-Teczniczna, Wrocław-Szkalarska Poręba 2000, s. 307-314.
- [165] Mönck W., Rug W.: *Holzbau. Bemessung und Konstruktion unter Beachtung von Eurocode 5*. Verlag Bauwesen Berlin, 2000.
- [166] Moses, D.M., Prion H.G.L.: *Bolted connections in structural composite lumber: anisotropic plasticity model*. Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, New Zealand, Vol. 2, 1999, s. 92-99.
- [167] Moses D.M., Prion H.G.L.: *Stress and failure analysis of wood composites: a new model*. Composites, Part B: Engineering, Vol. 35, Issue 3, 2004, s. 251-261.
- [168] Nanni A.: *North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues*. Construction and Building Materials, Volume: 17, September-October, 2003, s. 439-446.
- [169] Neuhaus H.: *Budownictwo drewniane*. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów, 2006.
- [170] Niczyj J., Wojtaszewski R.: *Obliczanie belek drewnianych zbrojonych kompozytem szklano - epoksydowym*. Inżynieria i Budownictwo 5, 1979, s. 182-185.

- [171] Nowak T.: *Wzmocnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. Wiadomości Konserwatorskie, Warszawa, 14/2003, s. 21-27.
- [172] Nożyński W.: *Ochrona drewna budowlanego*. Kalejdoskop Budowlany, 3/1998, s. 24-30.
- [173] Nożyński W., Wiejak A., Abram A.: *Problemy trwałości konstrukcji drewnianych z uwagi na korozję biologiczną*. V Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, maj 2002, s. 229-235.
- [174] Ntibarikure M.C.: *Palazzo Nobili in Lucca*. Low intrusion conservation systems for timber structures, Final Meeting Minutes, Task 9: Real Life Case Study Trials, 17 March 2005.
- [175] Ochelski S.: *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*. WNT, Warszawa 2004.
- [176] Ogawa H.: *Architectural application of carbon fibers: Development of new carbon fiber reinforced glulam*. Carbon Volume: 38, 2000, s. 211-226.
- [177] Orłowicz R., Gil Z., Fanderejewska E.: *Nośność na wyciąganie prętów spiralnych stosowanych w złączach konstrukcji drewnianych*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 161-167.
- [178] Orłowicz R., Sierov E.: *Odkształcalność drewna jako materiału anizotropowego*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 95-102.
- [179] Ościłowska B.: *Ocena zachowań się drewna w pożarze – dwa błędne stereotypy*. Przemysł drzewny 12/2000, s. 4-5.
- [180] Plenzler R.: *Redystrybucja naprężeń w zginanych elementach zespolonych z drewna i płyty pilśniowej*. Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Świnoujście, 27-28 września 1999, s. 67-76.
- [181] Plessner H.: *Niektóre problemy oceny uszkodzonych elementów*. Ochrona i Konserwacja Zabytków nr 13, Warszawa 2002, s. 89-96.
- [182] PN-75/D-04123. *Drewno. Oznaczanie modułu sprężystości przy zginaniu statycznym w strefie czystego zginania*.
- [183] PN-77/D-04101. *Drewno. Oznaczanie gęstości*.
- [184] PN-77/D-04103. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne*.
- [185] PN-77/D-04227. *Drewno. Ogólne wytyczne pobierania i przygotowania próbek*.
- [186] PN-77/D-04229. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien*.
- [187] PN-79/D-04102. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien*.
- [188] PN-79/D-04105. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien*.
- [189] PN-81/D-04107. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien*.
- [190] PN-81/D-04108. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien*.
- [191] PN-B-03150:2000. *Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [192] PN-EN 13183-1:2004. *Wilgotność sztuki tarcicy. Część 1: Oznaczanie wilgotności metodą suszarkowo-wagową*.
- [193] PN-EN 1542:2000. *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie*.
- [194] PN-EN 196-1:2005 (U). *Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*.
- [195] PN-EN 380:1998. *Konstrukcje drewniane. Metody badań. Ogólne zasady badań pod obciążeniem statycznym*.
- [196] PN-EN 384:2004. *Konstrukcje drewniane. Oznaczanie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości*.
- [197] PN-EN 408:2004. *Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo. Oznaczanie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych*.
- [198] PN-EN ISO 527-5:2000. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo*.

- [199] Qiao P, Davalos J.F, Trimble B.: *Qualification of adhesives for bonding wood to fiber-reinforced plastics*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 494-499.
- [200] Quagliarini E. D’Orazio M., Stazi A.: Rehabilitation and consolidation of high-value "camorcanna" vaults with FRP, *Journal of Cultural Heritage* Number 7, 2006, s. 13-22.
- [201] Radford D.W., Van Goethem D., Gutkowski R.M., Peterson M.L.: *Composite repair of timber structures*. *Construction and Building Materials* Volume: 16, October, 2002, s. 417-425.
- [202] Ramesh M.V., Seetharamu K.N., Ganesan N., Sivakumar M.S.: *Analysis of machining of FRPs using FEM*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, n 12, December 1998, s. 1531-1549.
- [203] Rapp P.: *Badania doświadczalne klejonych wzdłużnych połączeń belek drewnianych*. V Konferencja Naukowa. *Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin, 17-18 maja 2002, s. 137-148.
- [204] Rapp P.: *Belki drewniane o dużej rozpiętości klejone z elementów grubowarstwowych*. IV Konferencja Naukowa, *Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin-Świnoujście, 27-28 września 1999, s. 291-296.
- [205] Rapp P.: *Klejone wzdłużne połączenia belek drewnianych w rewaloryzacji obiektów zabytkowych*. IV Konferencja Naukowa, *Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin-Świnoujście, 27 - 28 września 1999 s. 283-290.
- [206] Rapp P., Lis Z.: *Badania belek drewnianych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych*. *Inżynieria i Budownictwo* Nr 7/2001, s. 390-392.
- [207] Rapp P., Lis Z.: *Odwrócenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w zginanych belkach drewnianych za pomocą zbrojenia rozproszonego z włókien węglowych*. X Konferencja Naukowo-Techniczna, Remo 2002, Wrocław-Zamek Kliczków, 2002, s.321-328.
- [208] Rapp P., Lis Z.: *Wzdłużne połączenia belek drewnianych wzmocnione prętami stalowymi*. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 3, 2001, s. 171-173.
- [209] Ritter M.A., Williamson T.G., Moody R.C.: *Innovations in Glulam Timber Bridge Design*. *Proceedings of Structures Congress*, April 24-28, 1994, s. 1298-1303.
- [210] Ross P.: *Appraisal and repair of timber structures*. Thomas Telford Publishing, London, 2002.
- [211] Rudziński L.: *Naprawy i wzmocnienia konstrukcji drewnianych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2000.
- [212] Runkiewicz L.: *Remonty i modernizacje obiektów budowlanych - określenia i stosowanie*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna, *Problemy remontowe w budownictwie ogólnym*, Wrocław-Kudowa Zdrój, 1998, s. 217-224.
- [213] Salmela K., Källsner B., Petersson H.: *Vibrations of wooden floor elements on supporting steel framework*. *World Conference on Timber Engineering*, Volume II, Lahti, Finland, June 14-17, 2004, s. 229-234.
- [214] Schober K.U., Rautenstrauch K.: *Experimental Investigations on Flexural Strengthening of Timber Structures with CFRP*. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures*, Hong Kong, China, December 7-9, 2005, s. 457-464.
- [215] Schober K.U., Rautenstrauch K.: *Post-strengthening of timber structures with CFRP's*. *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-006-9128-6, Springer on line, 2006.
- [216] Serrano E.: *A numerical study of the shear-strength-predicting capabilities of test specimens for wood-adhesive bonds*. *International Journal of Adhesion and Adhesives* Volume: 24, February, 2004, s. 23-35.
- [217] Serrano E.: *Glued-in rods for timber structures - a 3D model and finite element parameter studies*. *International Journal of Adhesion and Adhesives* Volume: 21, 2001, s. 115-127.
- [218] Siebler A., Vafakish Homae A.: *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus Brettschichtholz und Carbonfaserverstärkten Kunststoffen*. *Forschungsarbeit FH*, Wiesbaden, 1999.

- [219] Sika CarboDur FRP Composites for repair & Strengthening of Structures. Sika, March 2003.
- [220] Smardzewski J.: *Wpływ niejednorodności drewna i spoiny klejowej na rozkład naprężeń stycznych w połączeniach meblowych*. Rozprawa habilitacyjna, Poznań, 1998.
- [221] Smólski J., Stępień P.: *Kryteria konserwatorskie doboru rozwiązań inżynierskich w zabytkach architektury – w świetle doktryny i praktyki konserwacji*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna. Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 21-23 maja 1998, s. 63-71.
- [222] Socha T.: *Badania belek drewnianych zbrojonych włóknokompozytami*. Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Świnoujście, 27-28 września 1999, s. 199-202.
- [223] Socha T.: *Sześcioparametrowy model reologii drewna*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 117-124.
- [224] Steiger R.: *Bonding of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) with wood*. In: Proceedings of COST E34 conference "Innovations in Wood Adhesives", Biel, Switzerland, 2004, s. 33-50.
- [225] Steiger R.: *Fibre reinforced plastics (FRP) in timber structures - investigations and developments*. Proceedings of the Eurowood Workshop 2002 on "Engineered Wood Products - Innovation and Exploitation", VTT Helsinki, Finland, June 2002.
- [226] Steiger R.: *Improved efficiency of timber structures*. Wood research, EMPA-Symposium, 17 Jan, 2003, s. 77-93.
- [227] *System Sika CarboDur: podstawowe informacje o systemach wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich za pomocą materiałów kompozytowych*. Sika Poland.
- [228] Tascioglu C., Goodell B., Lopez-Anido R.: *Bond durability characterization of preservative treated wood and E-glass/phenolic composite interfaces*. Composites Science and Technology, vol. 63, n. 7, 2003, s. 979-991.
- [229] Tingley D. A., Gai. C.: *FRP reinforced glulam performance: a case study of the Lighthouse Bridge*. 5-th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland, August 17-20, 1998, s. 177-181.
- [230] Trapko T.: *Nośność żelbetowych słupów ściskanych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych*. Rozprawa doktorska, Wrocław, 2004.
- [231] Triantafyllou T.C.: *Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood*. Composites Science and Technology, Vol. 58, 1998, s. 1285-1295.
- [232] Triantafyllou T.C.: *Shear reinforcement of wood using FRP materials*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 9, 1997, s. 65-69.
- [233] Triantafyllou T., Deskovic, N.: *Prestressed FRP Sheets as External Reinforcement of Wood Members*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 118(5), 1992, s. 1270-1284.
- [234] Trummer A., Bergmeister K., Kernbichler K.: *Verstärkung konstruktiver Details von Brettschichtholzträgern mit Glasfasergewebe*. Bautechnik 81, Heft 3, 2004, s. 163-171.
- [235] US standard ICBO/Uniform Building Code 5100.
- [236] US standard ICBO/Uniform Building Code 6046.
- [237] Van de Kuilen J., Dejong M.: *3D-numerical modeling of DVW-reinforced timber joints*. 8-th World Conference on Timber Engineering, Volume II, Lahti, Finland, June 14-17, 2004, s. 137-142.
- [238] Van Gemert D., Vanden Bosch M.: *Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin*. Materials and Structures, Volume 20, Number 3, May 1987, s. 165-170.
- [239] Ważny J., Karyś J. i inni: *Ochrona budynków przed korozją biologiczną*. Arkady, Warszawa, 2001.
- [240] Wheeler A. S., Hutchinson A. R.: *Resin repairs to timber structures*. International journal of adhesion and adhesives, Vol.18, No 1, 1998, s. 1-13.

- [241] Woźniak G.: *Ocena odporności ogniowej konstrukcji drewnianych według eurokodów*. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004, s. 183-190.
- [242] Wu H. C.: *Advanced civil infrastructure materials: Science, mechanics and applications*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2006.
- [243] *Zasady stosowania kompozytów włóknistych (FRP)*. S&P Clever Reinforcement Company AG.
- [244] Zenkteler M.: *Kleje i klejenie drewna*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu. Poznań, 1996.
- [245] Zobel H., Alkhafaji T.: *Mosty drewniane*. WKŁ, Warszawa, 2006.
- [246] Żaboklicki A.: *Rehabilitacja drewnianych konstrukcji w zabytkowych obiektach architektury i budownictwa*. Konferencja Naukowo-Techniczna. Konserwacja, wzmocnianie i modernizacja budowlanych obiektów historycznych i współczesnych, Kielce, 22-23 lutego 2001, s. 163-179.
- [247] Żaboklicki A.: *Wzmocnianie konstrukcji drewnianych zwłaszcza zabytkowych za pomocą kompozytów polimerowych*. Sympozjum Naukowe, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 5-6 września 1996, s. 353-360.