

Ludomir Jankowski, Jerzy Jasieńko, Dariusz Styś

Badania wybranych połączeń klejowych przydatnych w rehabilitacji i wzmacnianiu zginanych belek drewnianych z wykorzystaniem elastooptyki

W pracy przedstawiono badania w skali technicznej naprawy i wzmacniania stref przypodporowych drewnianych belek zginanych obiektów historycznych, będące częścią szerszego programu badawczego realizowanego w Politechnice Wrocławskiej i University of Technology, Eindhoven (Holandia). Podjęto też próbę wykorzystania badań elastooptycznych modeli połączeń klejowych w celu uzyskania danych w obszarze pracy statycznej i deformacji do ich prawidłowego modelowania.

1. Elastooptyczne badania wybranych połączeń klejowych realizowanych w modelach belek zginanych

Kontynuując studia nad pracą wybranych połączeń klejowych przeprowadzono badania kilku modeli połączeń przy zastosowaniu metody elastooptycznej. Starano się ustalić przyczyny procesów zniszczeń obserwowanych na modelach fizycznych belek drewnianych. Badania elastooptyczne są wykorzystywane do jakościowej oceny pracy statycznej i stanu odkształceń konstrukcji obiektów zabytkowych (m.in. spektakularne badania katedry w Reims).

1.1. Podstawowe zależności metody elastooptycznej

Do wyjaśnienia przyczyn zniszczenia połączeń klejowych wykorzystano izochromy i izokliny uzyskane za pomocą badań elastooptycznych przeprowadzanych na przezroczystych modelach elementów konstrukcyjnych. Istota fizyczna tej metody sprowadza się do wykorzystania znanych w optyce zjawisk polaryzacji światła i dwójłomności wy-

muszonej niektórych materiałów. W stosowanych praktycznie w elastooptyce materiałach kierunki głównych osi optycznych pokrywają się z kierunkami naprężeń głównych, a wartości tych naprężeń są proporcjonalne do współczynnika załamania światła na tych kierunkach. W ogólnym przypadku związki ten opisują równania Maxwella dla przestrzennego stanu naprężeń:

$$n_i - n_o = C_1 \cdot \sigma_i + C_2 \cdot (\sigma_j + \sigma_k) \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

gdzie: $j \neq i, k \neq i, j \neq k$

Jeżeli model elastooptyczny znajduje się w płaskim stanie naprężeń, to równanie (1) można zapisać w postaci:

$$n_1 - n_o = \frac{\delta_1 \cdot \lambda}{2\pi t} = C_1 \cdot \sigma_1 + C_2 \cdot \sigma_2 \quad (2)$$

$$n_2 - n_o = \frac{\delta_2 \cdot \lambda}{2\pi t} = C_1 \cdot \sigma_2 + C_2 \cdot \sigma_1$$

gdzie:

n_o – współczynnik załamania światła, dla $i=2=0$,

λ – długość fali światła,

t – grubość materiału modelu,

C_1, C_2 – optyczne współczynniki naprężenia materiału modelu,

δ_1, δ_2 – bezwzględna różnica faz.

Obserwowany w praktyce w świetle spolaryzowanym efekt dwójłomności wymuszonej, w posta-

ci prążków interferencyjnych (izochrom), jest związany z różnicą naprężeń głównych prawem Wertheima:

$$\delta = 2\pi \cdot t \cdot C \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} \quad (3)$$

gdzie:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

$$C = C_1 - C_2$$

lub (po wprowadzeniu pojęcia tzw. rzędu izochromy oraz stałych elastoptycznych):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{K_\sigma^{1,0}}{t} \cdot m \cdot K_\sigma \cdot m \quad (4)$$

gdzie:

$K_\sigma^{1,0}$ – elastoptyczna stała materiałowa,

K_σ – elastoptyczna stała modelowa,

m – rząd izochromy.

Jak wynika z powyższych zależności, zarejestrowany obraz izochrom zawiera informacje o różnicy naprężeń głównych występujących w analizowanym obszarze, natomiast prążki interferencyjne zwane izoklinami dostarczają informacji o kierunkach naprężeń głównych.

Stałe $K_\sigma^{1,0}$ i K_σ wyznacza się z reguły na drodze pomiarów wzorcujących, które polegają na przyporządkowaniu danemu rzędowi izochromy określonej wartości naprężenia.

1.2. Opis modeli oraz stanowiska badawczego

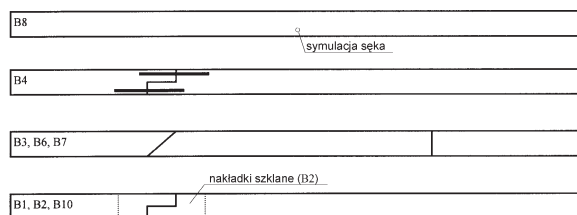
Badano beleczki zginane, wykonane z materiału o cechach dwójłomności, w których zamodelowano różne rodzaje połączeń klejowych, wzmocnień oraz materiałowych osobliwości, wywołanych niejednorodną strukturą drewna (sęki i rozwarstwienia).

Modele badanych belek wykonano z kompozycji epoksydowej. Poszczególne próbki wycięto z płyty odlanej z kompozycji o składzie:

- * żywica *Epidian 5* – 100 części wagowych,
- * ftalan dwubutyłu – 12,5 części wagowych,
- * utwardzacz Z-1 – 10 części wagowych.

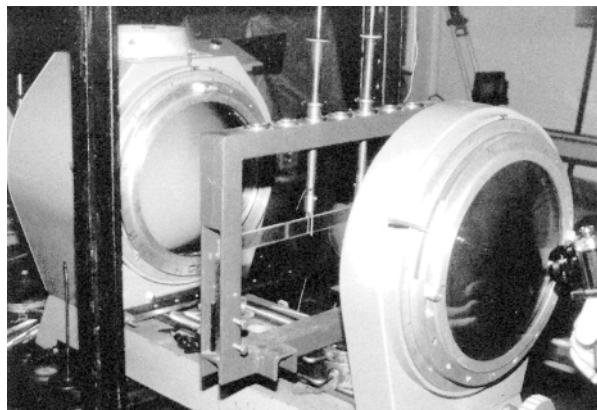
Polimeryzacja tego materiału zachodzi w temperaturze otoczenia, w czasie 24-48 godzin. Po wyjęciu płyty z formy, poddano ją wygrzewaniu w temperaturze 50°C przez okres czterech godzin w celu uzyskania stabilnych własności mechaniczno-optycznych. Następnie wycięto z wykonanej płyty 11 modeli belek. Wymiary przekroju poprzecznego próbek wynosiły: $b \times h \times l = 0,01 \times$

0,026 x 0,50 m. Niektóre z wykonanych beleczek przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Wybrane przykłady próbek wykonanych dla badań elastoptycznych

Z uwagi na konieczność zachowania ciągłej osi podłużnej belek oraz uzyskania gładkich powierzchni brzegowych, próbki wycinano z płyty z nadatkiem; następnie belki przecinano wykonując połączenie oraz ewentualne wzmocnienie, a krawędzie szlifowano dożądanego wymiaru. Elastoptyczną stałą modelową dla belek wyznaczano na podstawie próby czystego zginania – $K_\sigma = 2,03 \text{ MN/m}^2$.



Rys. 1.2. Widok stanowiska do modelowych badań elastoptycznych

Dodatkowym parametrem mającym wpływ na rozkład naprężeń w badanych połączeniach była sztywność skleiny. Dlatego też, w niektórych przypadkach połączeń, testowano dwa rodzaje połączenia – z klejem mniej i bardziej plastycznym. Cechy kleju regulowano za pomocą zawartości utwardzacza oraz plastyfikatora.

Dla celów modelowych badań elastoptycznych wykorzystano stanowisko badawcze, które przedstawiono na rys. 1.2. Przystosowano je do badania beleczek o schemacie statycznym belki wolnopodpartej, o rozpiętości $l = 0,49 \text{ m}$, w osiach podpór. Układ obciążający stanowiły siły skupione, przyłożone do testowanego elementu za pomocą trzpieni. Realizowano schemat zginania 4-punktowego – siły rozmieszczono w odległościach $a = 0,165 \text{ m}$ od osi podpór.

1.3. Wyniki badań elastoptycznych

W trakcie pomiarów zarejestrowano obrazy izochrom i izoklin w belkach zginanych. Ponieważ spodziewana nośność beleczek z poszczególnymi połączeniami była różna, przyjęto zasadę nieprzekraczania obciążeń powodujących powstawanie izochrom o rzędach wyższych niż $m = 4-5$. Dzięki temu założeniu nie uzyskano trwałych odkształceń materiału modelowego. Występujące w niektórych modelach wstępne efekty optyczne należy wiązać z zabiegami technologicznymi (wiercenie otworów, skurcz kleju, itp.).

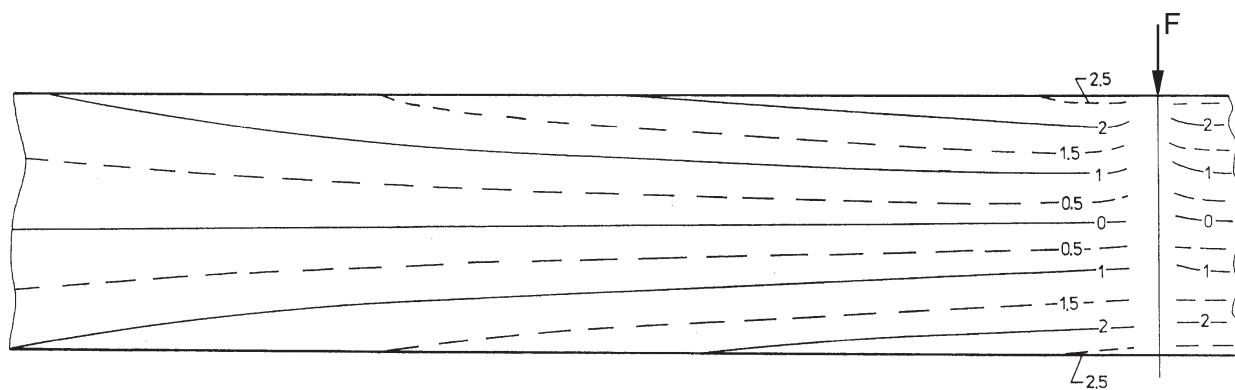
Celem badań była obserwacja jakościowych efektów, przejawiających się zmianami w układach izochrom i rozkładach naprężeń, wywołanych różnego rodzaju koncentratorami naprężeń (połączenia, wzmocnienia, otwory). Należy zaznaczyć, że rezultaty badań modelowych wykonanych na modelach izotropowych nie powinny być bezpośrednio ekstrapolowane na rzeczywisty materiał – w szczególności anizotropowy, a tym bardziej ortotropowy – bez podania pewnych warunków ograniczających.

W przypadku drewna można wyróżnić dwa poziomy obserwacji struktury materiału:

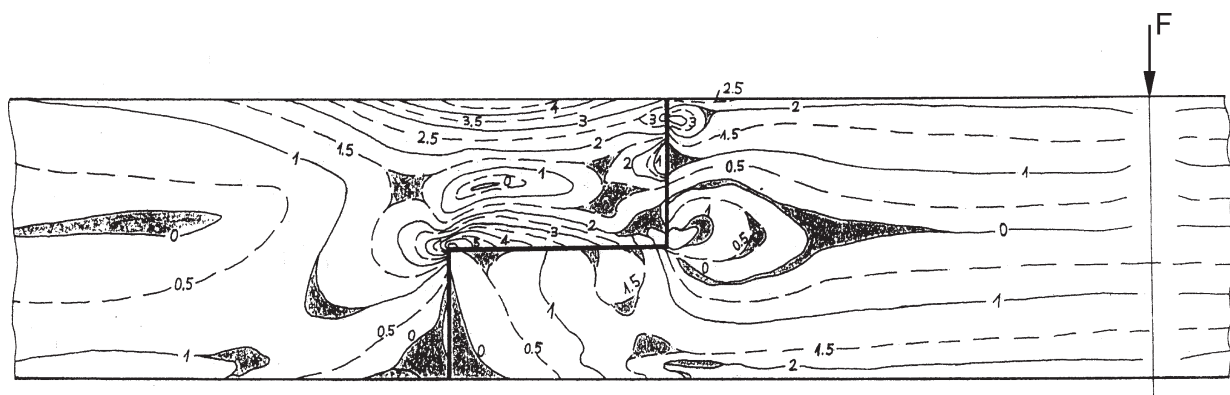
- ★ poziom I, na którym drewno traktujemy jako jednorodne ciało sprężyste bez wyraźnych cech anizotropii,
- ★ poziom II, na którym zachowanie się całego elementu drewnianego pod obciążeniem jest zdominowane przez ortotropowy charakter materiału, determinujący mechanizm zniszczenia.

Obrazy uzyskane z badań modelowych, prowadzonych w granicach poziomu I, pokazują, przede wszystkim, rozkłady naprężeń oraz przebieg procesu ich piętrzenia. W przypadku większej populacji próbek, istniała by możliwość podjęcia próby sformułowania ocen ilościowych uzyskanych wyników. Materiał skleiny, zarówno w przypadku badań modelowych, jak i badań belek w skali technicznej, był taki sam jak w przypadku badań elastoptycznych.

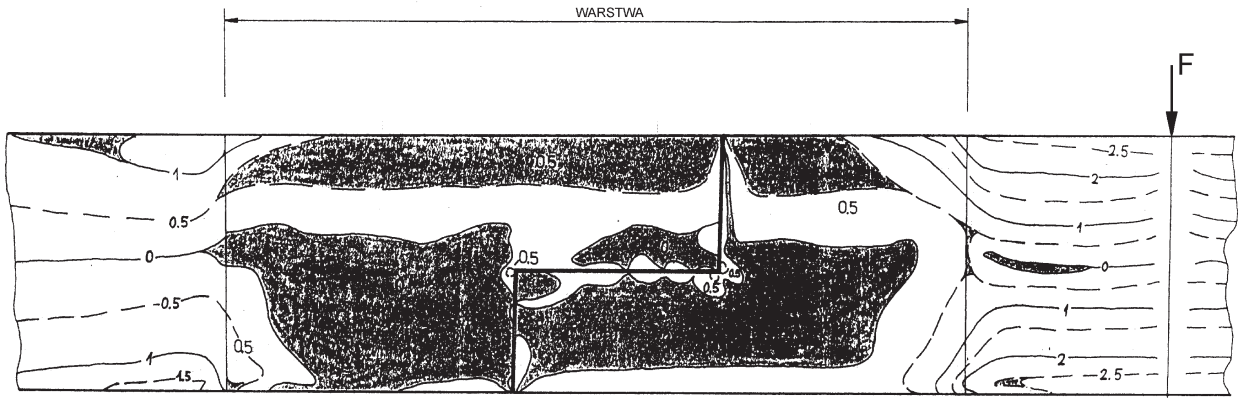
Na rysunkach 1.3-1.13 przedstawiono charakterystyki badanych belek wraz z opisem uzyskanych rezultatów.



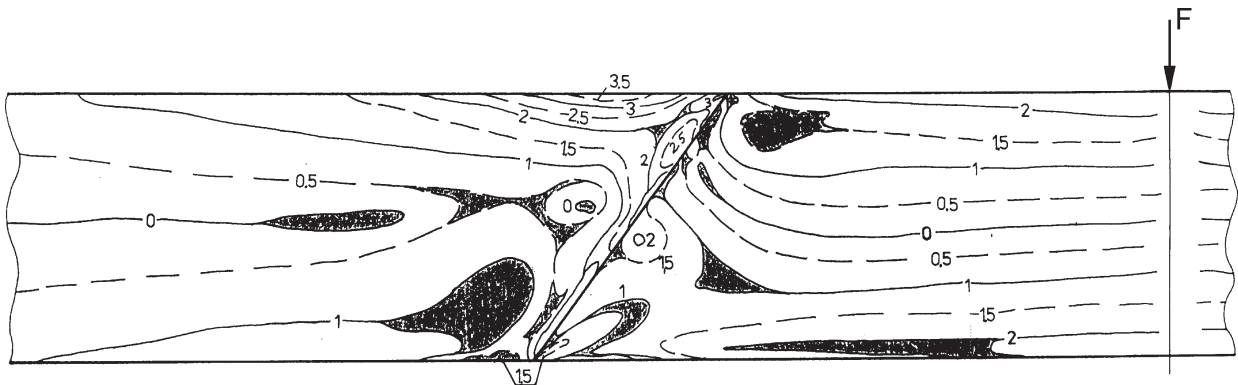
Rys. 1.3. Układ izochrom w belce B-0 – belka „wzorcowa”, wykonana jako jednorodny element z materiału elastoptycznego. Widoczny charakterystyczny dla czystego zginania układ izochrom



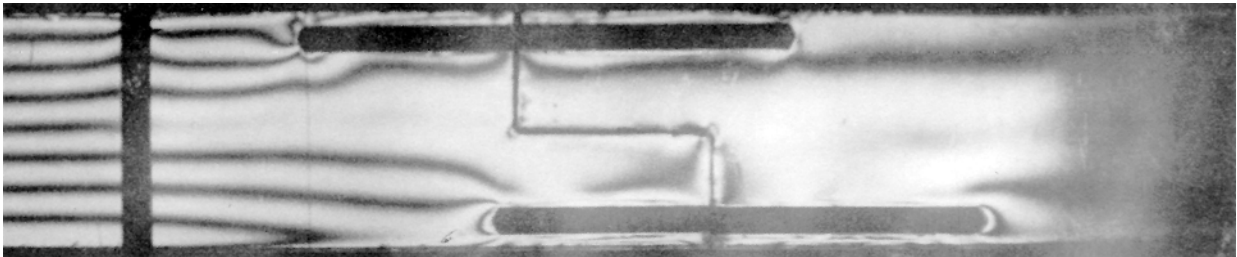
Rys. 1.4. Układ izochrom w belce B-1 – belka ze złączeniem wykonanym w formie zamka „schodkowego”, połączenie przy użyciu „słabego” spoiwa. Widoczne wyraźne nieciągłości na granicy obydwu części belki wywołane odkształceniami spoiny. Znaczne koncentracje naprężeń w części rozciąganej zamka wskazują na dekohezję połączenia



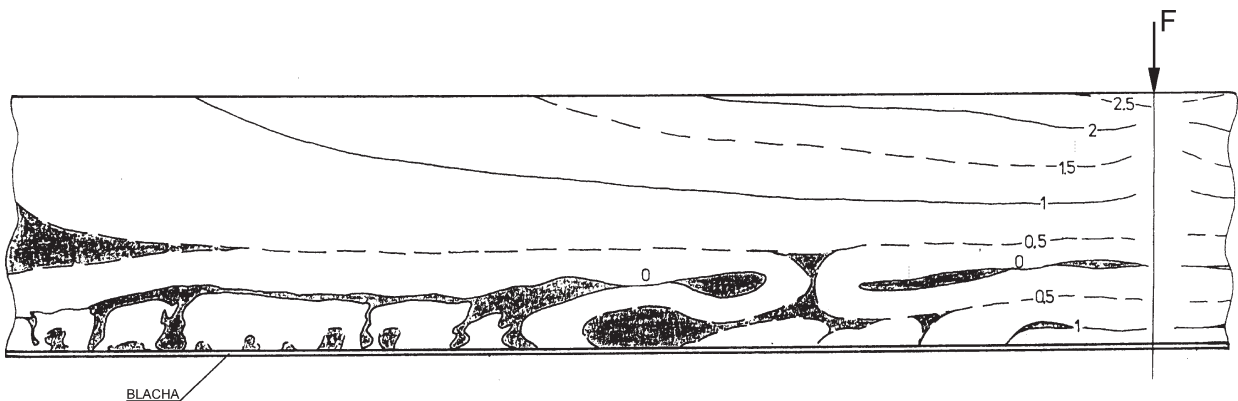
Rys. 1.5. Układ izochrom w belce B-2 – belka z zamkiem „schodkowym” wzmocniona w obrębie zamka nakładkami z płytek szklanych grubości 1 mm, połączenie przy użyciu kleju o wyższych parametrach wytrzymałościowych. Widoczny wyraźny spadek naprężeń w obrębie wzmocnienia. Przy krawędziach nakładek znaczne gradienty naprężeń związane z nieciągłą zmianą sztywności



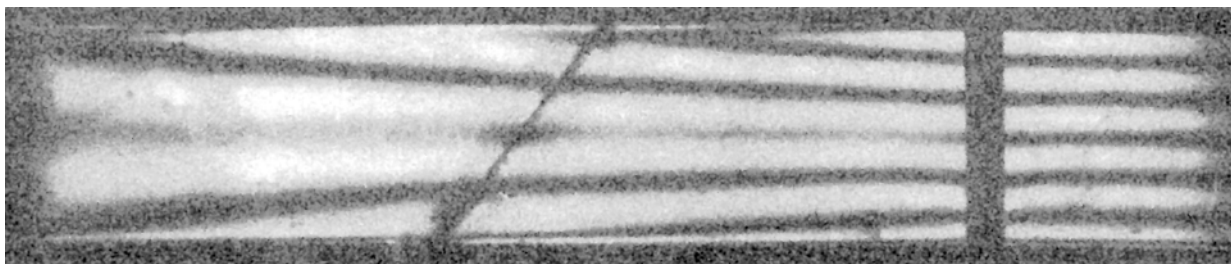
Rys. 1.6. Układ izochrom w belce B-3 – belka z połączeniem w formie zamka ukośnego, połączenie przy użyciu „słabego” kleju. Widoczne wyraźne skoki naprężeń w obrębie połączenia



Rys. 1.7. Układ izochrom w belce B-4 – zamek „schodkowy”, przy górnej i dolnej krawędzi pręty stalowe, połączenie przy użyciu kleju o większej sztywności. Widoczna wyraźna koncentracja naprężeń na zakończeniach podłużnych otworów, w które wprowadzono pręty wzmocniające, przy jednoczesnym odciążeniu zamka



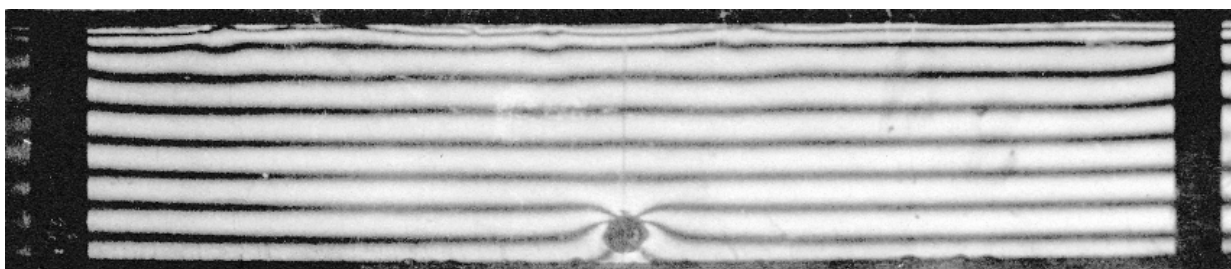
Rys. 1.8. Układ izochrom w belce B-5 – jednorodna belka wzmocniana blachą stalową w strefie rozciąganej



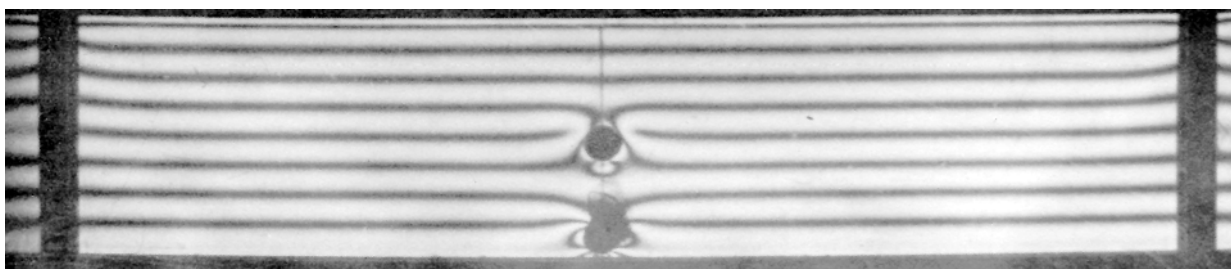
Rys. 1.9. Układ izochrom w belce B-6 – połączenie w formie zamka ukośnego, zastosowano „mocny” klej. Zaburzenia w układzie izochrom ograniczają się do bezpośredniego sąsiedztwa skleiny. Ogólny przebieg izochrom jest porównywalny z układem wzorcowym zarejestrowanym w belce B-0



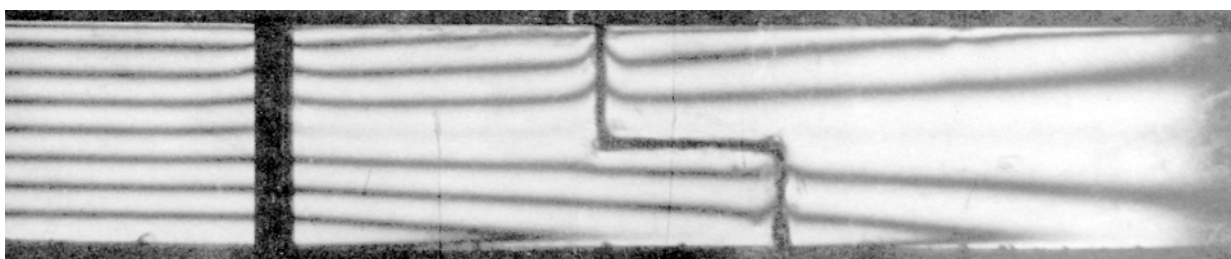
Rys. 1.10. Układ izochrom w belce B-7 – belka z zamkiem wertykalnym, wykonana na bazie „mocniejszej” kompozycji klejowej. Układ linii izochrom jest praktycznie niezaburzony z wyjątkiem bezpośredniego sąsiedztwa połączenia



Rys. 1.11. Układ izochrom w belce B-8 – w izotropowym modelu elastoptycznym modelowano obecność sęka, wprowadzając w rozciąganej strefie belki w przekroju środkowym otwór o średnicy 4 mm. Widoczna jest charakterystyczna koncentracja naprężeń wokół otworu. Wpływ inkluzji na naprężenia jest wyraźnie lokalny



Rys. 1.12. Układ izochrom w belce B-9 – w modelu tym zamodelowano obecność dwóch sęków usytuowanych współosiowo w przekroju środkowym. Wywiercone otwory o średnicach 4 mm wprowadzają znaczne lokalne zaburzenia naprężeń. Widoczne są wyraźne różnice w oddziaływaniu otworu położonego w osi obojętnej w porównaniu z otworem usytuowanym przy krawędzi rozciąganej. Daje się zaobserwować efekt interakcji pomiędzy dwoma wtrąceniami



Rys. 1.13. Układ izochrom w belce B-10 – belka ze złączeniem wykonanym w formie zamka „schodkowego”, przy użyciu „mocniejszej” kompozycji klejowej. W obrębie połączenia występują jedynie nieznaczne zaburzenia w układzie izochrom, bardzo zbliżonym do zarejestrowanego w belce wzorcowej B-0

1.4. Wnioski

Uzyskane w czasie badań informacje można sprowadzić do kilku wniosków szczegółowych:

1. Decydujący wpływ na pracę połączenia miały parametry kleju. Przy stosowaniu kompozycji nie wykazujących dużych odkształceń plastycznych, zaburzenia naprężeń w obrębie zamków miały charakter lokalny, a bezwzględne wielkości naprężeń nie odbiegały w sposób istotny od naprężeń zarejestrowanych w belce wzorcowej. Zasadnicze zmiany w rozkładach naprężeń oraz znaczne ich koncentracje w „zamykach” wprowadzały skleiny o dużych gradientach odkształceń względnych.

2. Kształt „zamka” nie wpływał zasadniczo na rozkład naprężeń w obrębie połączenia.

3. W połączeniach z nakładkami zaobserwowano wyraźny spadek naprężeń w obrębie wzmocnienia. Przy krawędziach nakładek wystąpiły znaczące gradienty naprężeń związane z nieciągłą zmianą sztywności.

4. Wprowadzenie elementów wzmacniających, w postaci nakładek lub prętów, spowodowało odciążenie „zamka” i przeniesienie punktów koncentracji naprężeń poza obszar połączenia.

5. Obecność inkluzji (np. sęków), w różnych miejscach przekroju poprzecznego, wprowadziła jedynie lokalne zaburzenia. Uwidoczniała się interakcja dwóch inkluzji, choć nie wywoływała ona efektów propagujących w widoczny sposób na całą wysokość przekroju belki, przy stosowanych poziomach obciążenia.

2. Badania modeli zginanych belek drewnianych (skala techniczna)

2.1. Cel i zakres badań

Badania przeprowadzono na belkowych elementach drewnianych o wymiarach 10 x 20 x 400 cm wykonanych z drewna sosnowego „starego” (wiek drewna oceniono na ok. 80 lat) i „nowego”. Belki z drewna „starego” wykonywano z przekrojów większych, usuwając obszary porażone przez gnicie oraz szkodniki techniczne drewna. Usunięto zatem te obszary, w których struktura drewna nie była strukturą włóknistą, pozostawiając jednak obszary niejednokrotnie rozwarstwione czy mocno spękane.

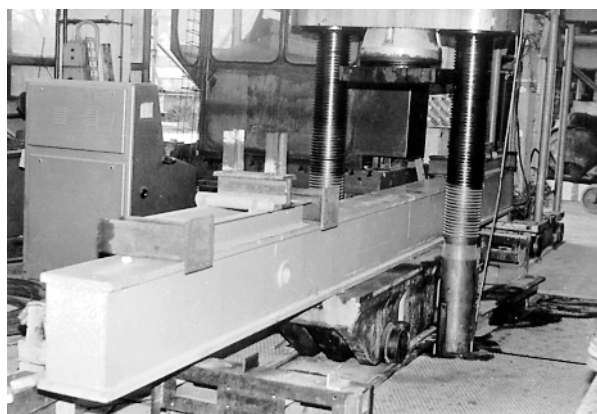
Zarówno w belkach wykonanych z drewna „starego” (DS), jak i drewna „nowego” (DN) nie starano się dobierać materiału o korzystnym, dla przypadku zginania, usłojeniu czy układzie sęków. Rozkłady usłojenia i sęków były losowe. Wszelkie parametry techniczne materiałów użytych do wykonania modeli ustalono na drodze badań normowych.

Obok oznaczeń DS (drewno „stare”) i DN (drewno „nowe”) – wprowadzono oznaczenia DSi oraz DSr. Modele, które oznaczono jako DSi, zostały wykonane z drewna „starego” poddanego modyfikacji poprzez impregnację węglbną pod ciśnieniem 3 atm., z zastosowaniem kompozycji epoksydowej, określanej dalej jako „iniekt” (skład: żywica *Epidian 5* – 100 części wagowych, ksylen – 30 części wagowych, butanol – 20 części wagowych, utwardzacz Z-1 – 11 części wagowych). Modele, których drewno oznaczano jako DSr, zostały wykonane z drewna „starego” poddanego impregnacji powierzchniowej poprzez trzykrotne powlekanie kompozycją epoksydową. W modelach tych wszelkie rozwarstwienia włókien i nieciągłości powierzchniowe struktury naprawiano również poprzez wypełnienie kompozycją epoksydową. W obu przypadkach (DSi oraz DSr), a także w przypadkach innych modeli, gdzie kompozycje epoksydowe wprowadzano do wnętrza przekroju, konieczne uszczelnienia końców belek czy drobne nieciągłości w płaszczyznach bocznych realizowano poprzez szpachlowanie gipsem lub kitem grafitowym.

Wszystkie, badane w tej grupie eksperymentów, modele były belkami o wymiarach 10 x 20 x 400 cm. Belki te poddawano czteropunktowemu zginaniu o rozstawie punktów przyłożenia obciążenia 1/3 i 2/3 rozpiętości belki, na stanowisku pokazanym na rys. 2.1.

Prezentowane wyniki, jak już wspomniano, są częścią obszernego programu badawczego.

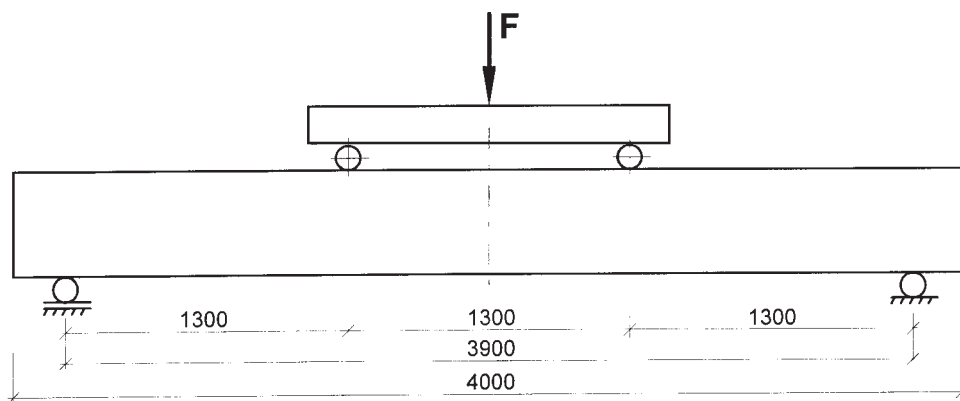
Schemat ideowy badania pokazano na rys. 2.2.



Rys. 2.1. Widok stanowiska badawczego

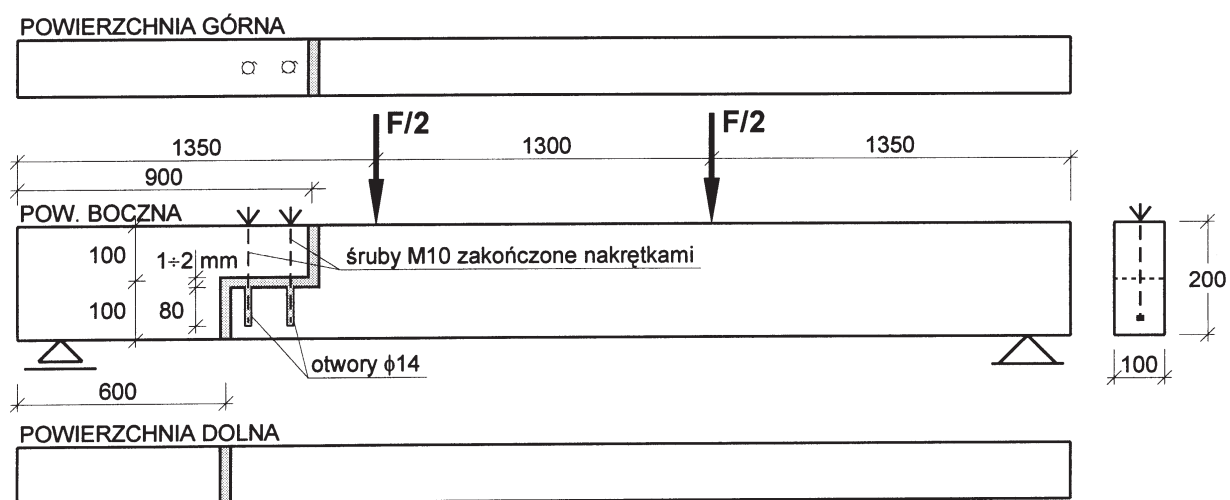
Serie B6, B7, B8

Badania w tych seriach belek podyktowane były spotykana w rzeczywistości koniecznością wymiany na nowe zużytych technicznie „głowicy” (stref przypodporowych) zginanych belek drewnianych. W belkach serii B6 wytworzono mocowanie „głowicy” poprzez skleinę poziomą oraz wklejone śruby M10 (założono brak dostępu do belki od dołu).



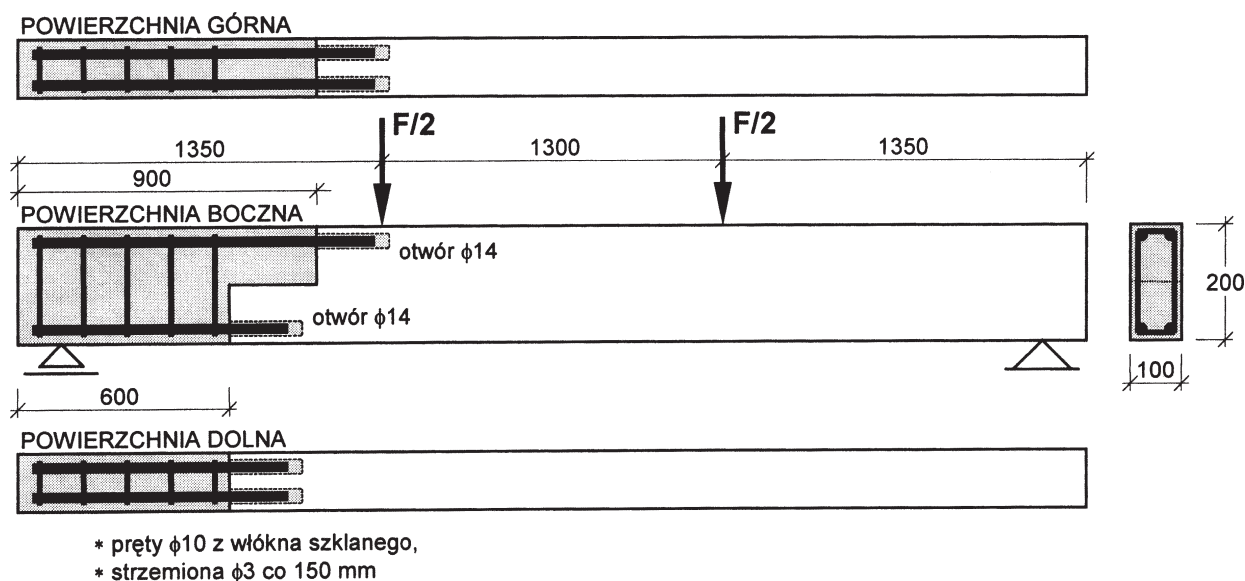
Rys. 2.2. Schemat ideowy badania

SERIA B6



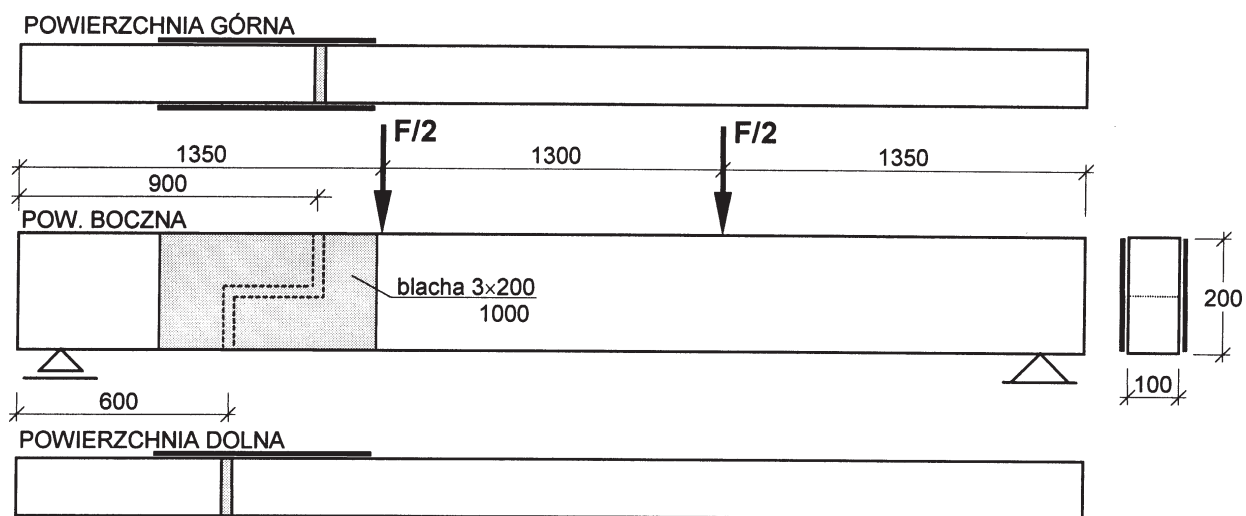
Rys. 2.3. Seria belek B6

SERIA B7



Rys. 2.4. Seria belek B7

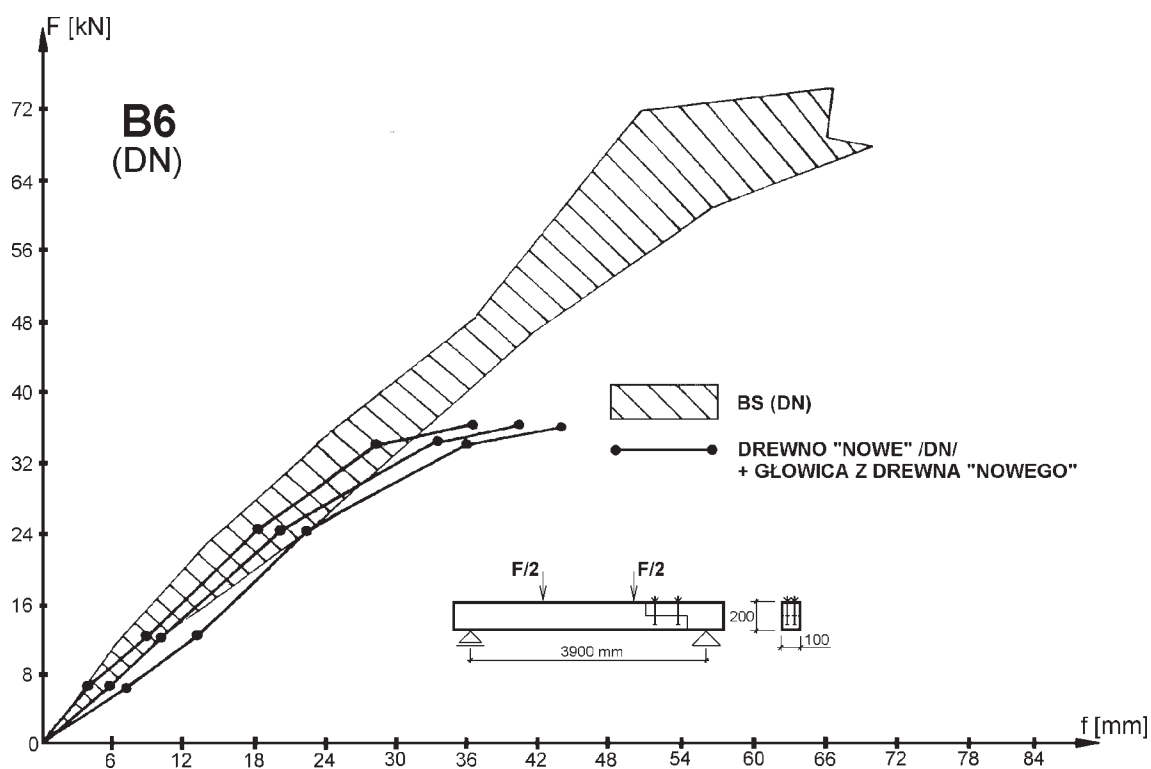
SERIA B8



Rys. 2.5. Seria belek B8

W belkach serii B7 nową „głowicę” stanowiła stwardniała kompozycja epoksydowa z wypełniaczem, a połączenie „głowicy” z belką wytworzono przy użyciu wklejanych prętów ϕ 10 mm z włókna szklanego. W belkach serii B8 nową „głowicę” połączono z belką przy użyciu doklejonych nakładek z blachy stalowej. Powierzchnie blach przygotowano do klejenia poprzez piasko-

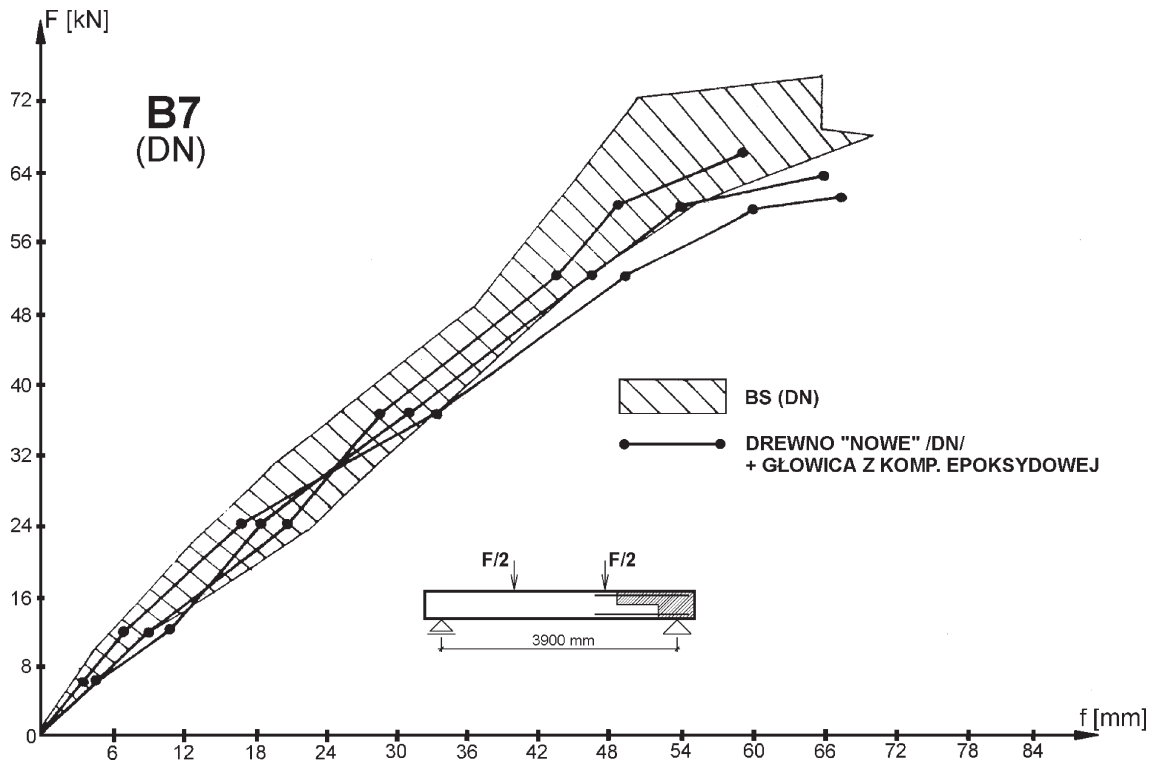
wanie. Mierzono dodatkowo odkształcenia przekrojów, w których występowało połączenie klejowe oraz przekrojów pełnych odpowiadających im swoim położeniem. Umieszczenie przekrojów, w których realizowano połączenie – 1/5 rozpiętości belki – wynikało z analizy przypadków destrukcji spotykanych w rzeczywistości. Badano po trzy belki w każdej serii.



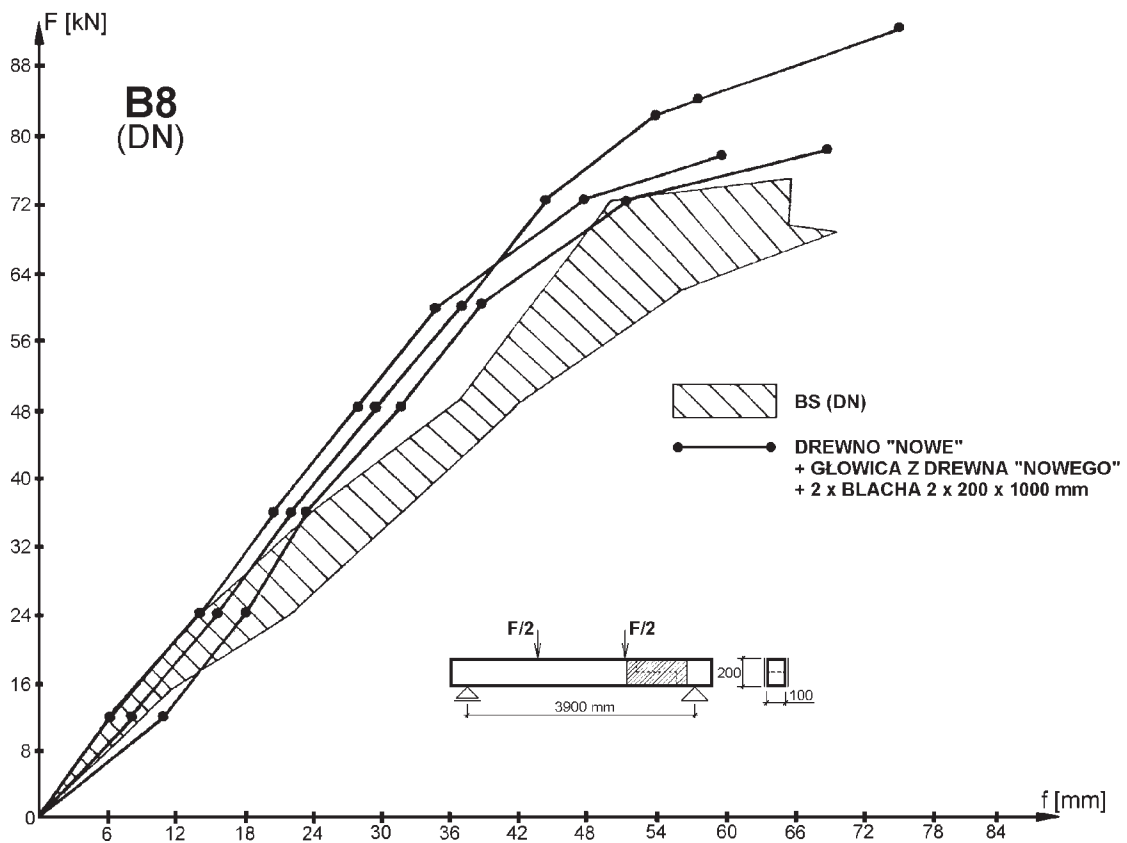
Rys. 2.6. Wykres zależności „obciążenie – ugięcie” dla belek serii B6 (DN)

2.2. Wyniki badań

Wyniki przedstawiono w postaci ścieżek równowagi statycznej belek po rehabilitacji.



Rys. 2.7. Wykres zależności „obciążenie – ugięcie” dla belek serii B7 (DN)



Rys. 2.8. Wykres zależności „obciążenie – ugięcie” dla belek serii B8 (DN)

3. Badania modeli zginanych belek drewnianych z wymienionymi strefami przypodporowymi przy zastosowaniu połączeń klejowych, prętów i blach stalowych oraz prętów GR

3.1. Cel i zakres badań. Opis modeli badawczych

W modelach badawczych symulowano wymianę użytych technicznie stref przypodporowych zginanych belek drewnianych (na nowe), a następnie badano pracę tak przygotowanych elementów. Głównym celem badań było uzyskanie informacji do szacowania optymalnych długości połączeń klejowych, l_z , w zależności od geometrii i własności materiałowych łączonych elementów oraz obserwacja obrazów zniszczeń.

Badania przeprowadzono na belkowych elementach drewnianych o wymiarach 9 x 24 x 440 cm, wykonanych z drewna jodłowego. Belki te poddano czteropunktowemu zginaniu, o rozstawie punktów przyłożenia obciążenia w 1/3 i 2/3 rozpiętości. Schemat ideowy badania elementów na stanowisku pomiarowym pokazano na rys. 3.1.

Przyrost obciążenia, przemieszczenia i odkształcenia w modelach rejestrowano automatycznie.

Zastosowano następujące kompozycje klejowe:

- w belkach z połączeniami, w których użyto elementów stalowych – mieszaninę na bazie żywicy epoksydowej *Araldite AW 106*,

utwardzacz *HV 953 U-N* i wypełniacz z cementu portlandzkiego „35”,

- w belkach z połączeniami, w których użyto prętów GR – żywicę epoksydową *Holzhan 20*.

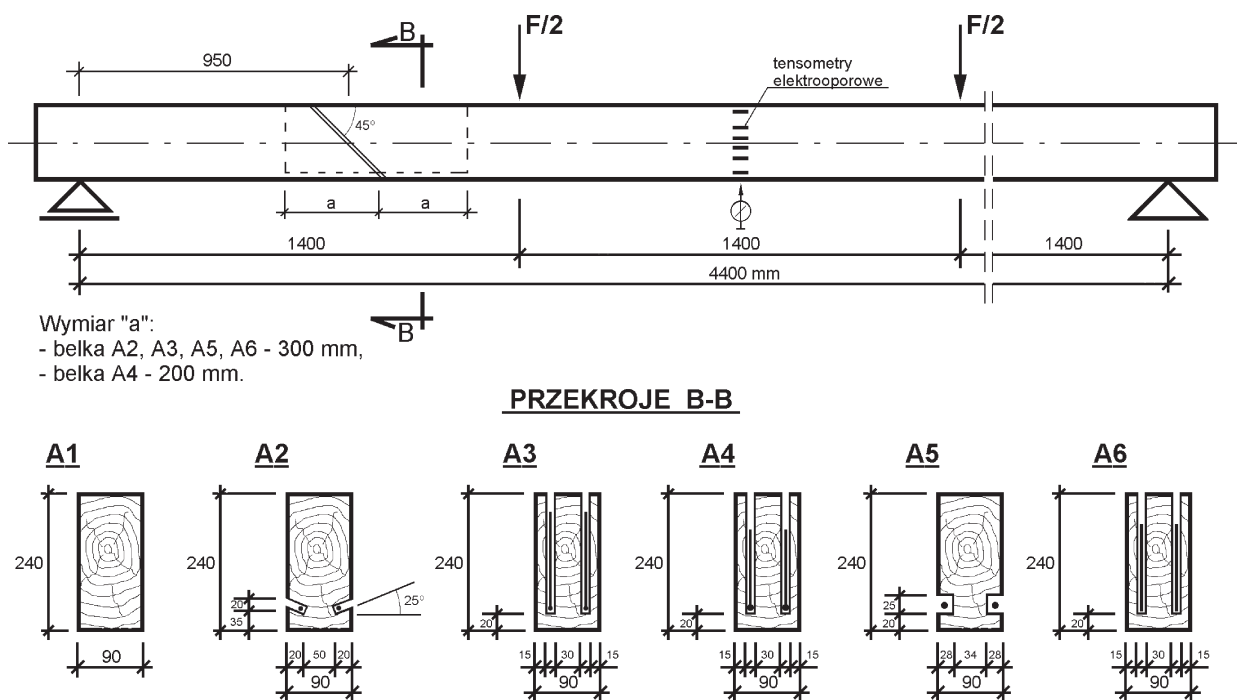
We wszystkich modelach z elementami stalowymi użyto tych samych materiałów, co w badaniach opisanych wcześniej, o charakterystykach geometrycznych i wytrzymałościowych ustalonych na drodze badań normowych. W belkach z prętami z włókna szklanego (GR) zastosowano materiały o następujących parametrach:

- ★ pręt GR (średnica ϕ 20,4 mm):
 - granica wytrzymałości, R_m – 311 MPa,
 - moduł sprężystości podłużnej, E – 0,381 x 105 MPa.
- ★ żywica epoksydowa *Holzhan 20* (7 dni po utwardzeniu):
 - wytrzymałość na zginanie, R_g – 45,12 MPa,
 - wytrzymałość na ściskanie, R_c – 64,88 MPa.

Podstawowe dane dotyczące użytych w badaniach elementów i materiałów zamieszczono w tab. 3.1.

Odpowiednio przygotowane elementy belkowe zostały poddane badaniu na stanowisku pokazanym na rys. 3.3. Mierzono:

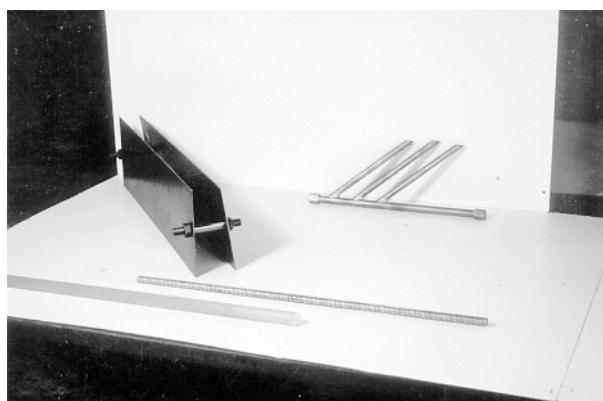
- odkształcenia w drewnie, w przekroju środkowym,
- odkształcenia w elementach wzmacniających połączenia klejowe (pręty stalowe, blachy stalowe, pręty GR),
- ugięcia belek.



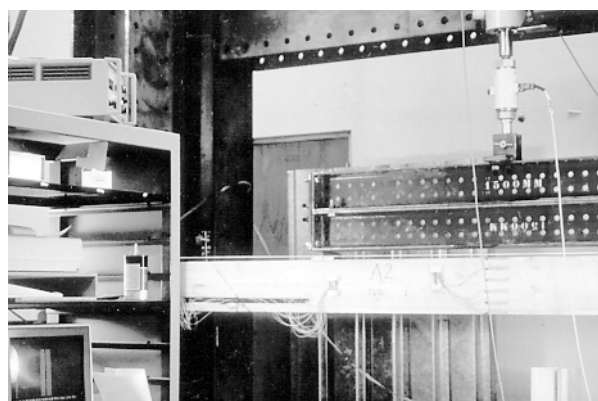
Rys. 3.1. Badane belki

Tab. 3.1. Dane dotyczące użytych w badaniach elementów oraz kompozycji klejowych

Symbol belki	Element wzmacniający w połączeniu klejowym	Rodzaj kompozycji epoksydowej
A1	belki „świadki” – grupa siedmiu belek	brak
A2	2 x stalowy pręt żebrowany ϕ 14, l = 600 mm	<i>Araldite AW 106</i>
A3	2 x stalowy pręt żebrowany ϕ 14, l = 600 mm, z przyspawanymi pod kątem 45° trzema prętami ze stali żebrowanej ϕ 12, l = 275 mm	<i>Araldite AW 106</i>
A4	2 x stalowy pręt gładki ϕ 14, l = 360 mm zakończony główkami ϕ 20, z przyspawanymi pod kątem 45° trzema prętami ze stali żebrowanej ϕ 12, l = 220 mm	<i>Araldite AW 106</i>
A5	2 x pręt GR ϕ 20,4, l = 600 mm	<i>Holzan 20</i>
A6	2 x blacha stalowa o wymiarach $g \times b \times h = 2 \times 160 \times 160$ mm	<i>Araldite AW 106</i>



Rys. 3.2. Użyte w badaniach elementy wzmacniające połączenia klejowe – pręty stalowe, blachy stalowe, pręty GR, wkładki stalowe z prętami ukośnymi



Rys. 3.3. Belka A2 w trakcie badania

3.2. Wyniki badań

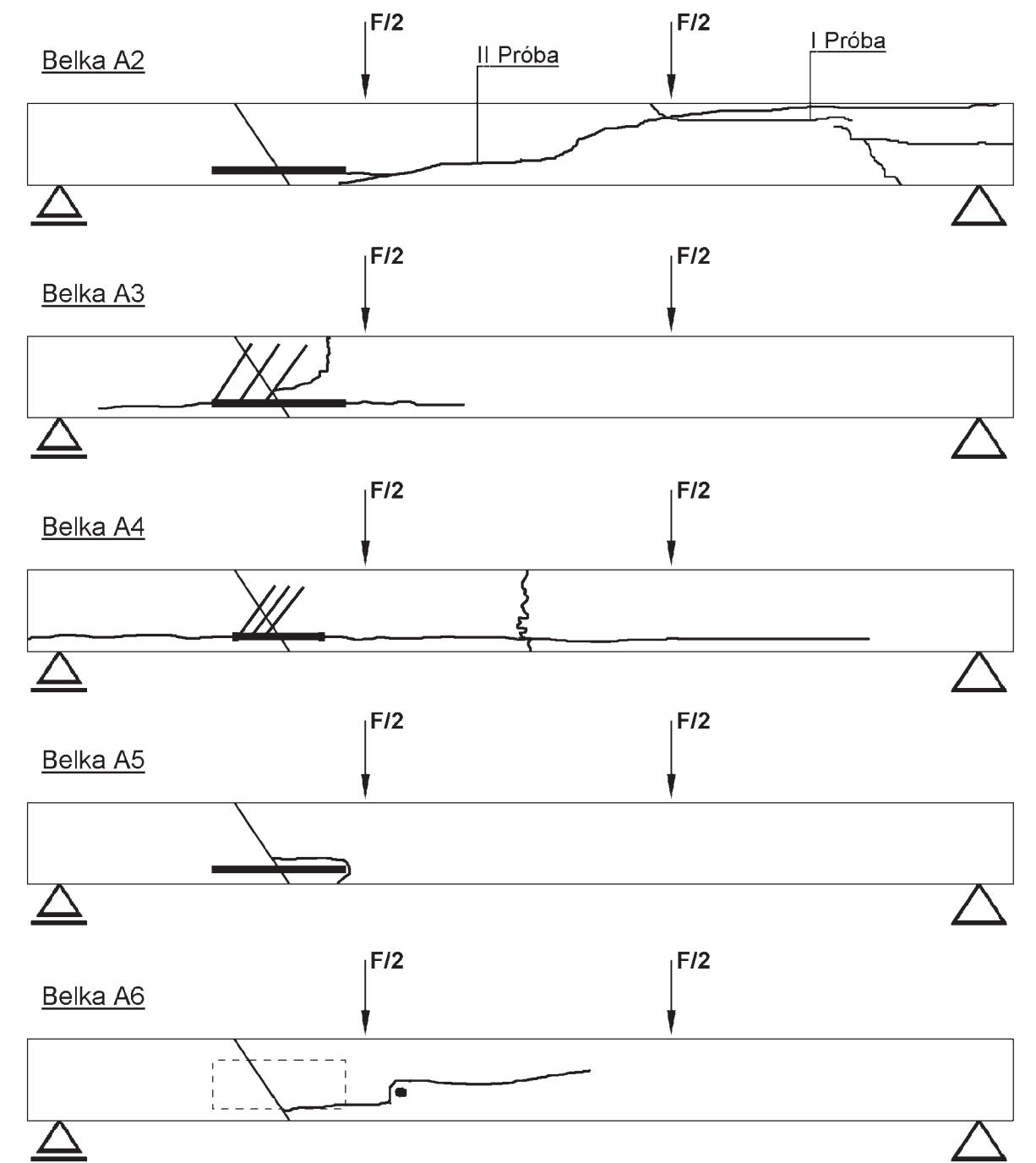
Na rys. 3.4 przedstawiono przebieg rys niszczących w poszczególnych elementach, zaś na rys. 3.5 wykresy zależności „obciążenie-ugięcie” badanych belek.

Opis zniszczenia badanych elementów:

Belki A1 – „świadki” (grupa siedmiu belek). Wyniki przedstawiono poprzez obwiednie pola mieszczące punkty, których współrzędne uzyskano w trakcie badań siedmiu belek. Najsłabsza belka posiadała defekt w postaci sęka w strefie rozciąganej, w przekroju pod siłą. Belka ta uległa zniszczeniu

w strefie rozciąganej. Zniszczenie przeszło również w strefę przypodporową.

Belka A2. Belka ta uległa zniszczeniu w miejscu inkluzji w drewnie (sęk), dlatego uzyskano mniejsze od spodziewanych nośności, rys. 3.6. W drugiej próbie belka została zniszczona przez utratę sił kohezji w drewnie w miejscu największych momentów zginających. W pierwszym etapie nastąpiło zniszczenie drewna w strefie rozciąganej, w drugim – ścięcie górnej części przekroju w strefie przypodporowej. W pierwszej próbie otrzymano siłę niszczącą, $F_n = 38,6$ kN, w drugiej, $F_n = 54,4$ kN. Maksymalne, lokalne naprę-

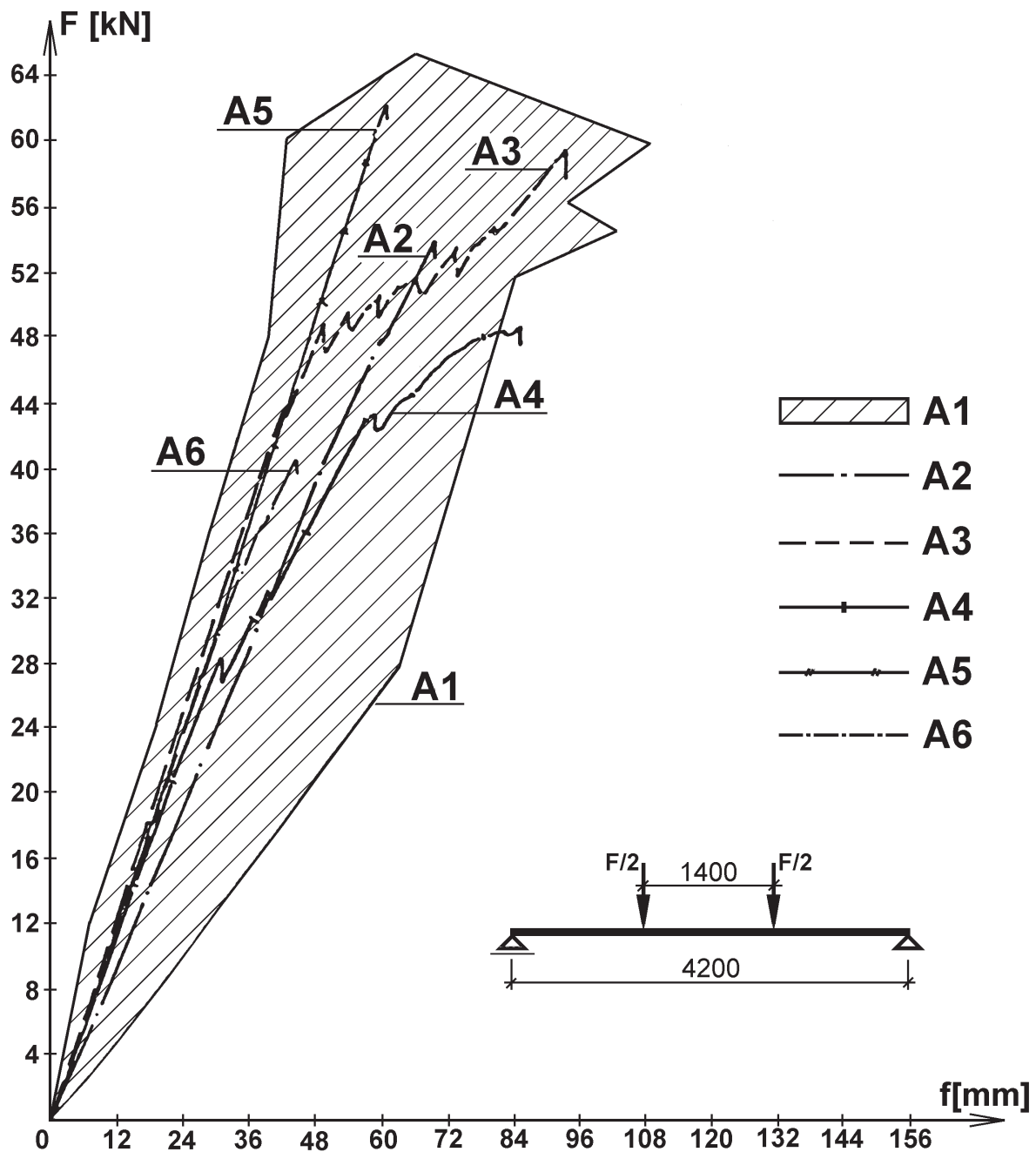


Rys. 3.4. Przebieg rys niszcących w poszczególnych elementach belkowych

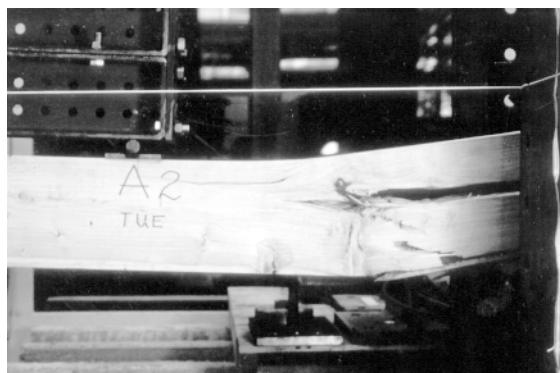
żenia ścinające przy zniszczeniu na styku „pręt-spoina” osiągnęły 3,69 MPa (II próba).

Belka A3. W belce A3 zniszczenie nastąpiło w dwóch etapach. Pierwszy to rozwarstwienie drewna w miejscu styku z kompozycją epoksydową na całej długości połączenia klejowego. Drugi to ścięcie przekroju „przez drewno” na długości połączenia klejowego i wysokości przekroju – zespolenie kompozycji epoksydowej z prętem stalowym pozostało nienaruszone, rys. 3.7. Otrzymało siłę niszczącą, $F_n = 59,8$ kN.

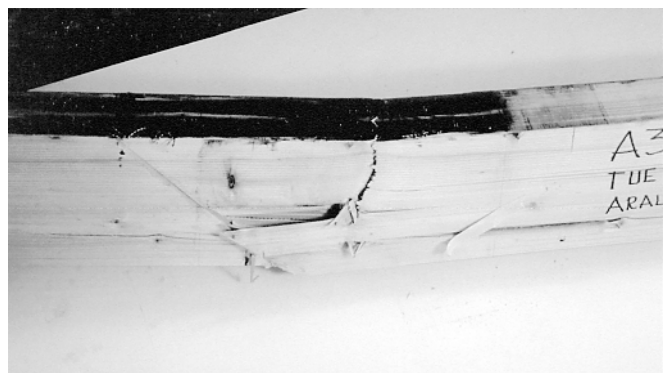
Belka A4. Proces zniszczenia belki A4 przebiegał podobnie jak w belce A3. Pierwszy etap to pojawienie się niszczącej rysy podłużnej, rozchodzącej się równomiernie w obu kierunkach, z centrum w środku połączenia klejowego. Na tym etapie nastąpiło rozwarstwienie drewna w przekroju zespolenia z kompozycją epoksydową. Drugi etap to ścięcie na całej wysokości przekroju, w środku rozpiętości badanej belki, rys. 3.8. Otrzymało siłę niszczącą $F_n = 49,0$ kN, ustalone maksymalne, lokalne naprężenia ścinające na styku „pręt-spoina” były równe 8,06 MPa.



Rys. 3.5. Wykresy zależności „obciążenie-ugięcie” w badanych belkach



Rys. 3.6. Widok zniszczonego elementu A2 (I próba)



Rys. 3.7. Widok zniszczonego elementu A3.

Belka A5. Zniszczenie belki A5 również przebiegało w dwóch etapach – pierwszy to ścięcie drewna pomiędzy wklejonymi prętami i rozwarstwienie drewna, przebiegające wzdłużnie, nad prętami. Drugi etap – to ścięcie przekroju biegnące od końca połączenia poprzez ukośne złącze klejowe z jednej strony do włókien najbardziej rozciąganych pod prętami – z drugiej strony, rys. 3.9. Otrzymano siłę niszczącą $F_n = 62,0$ kN, a maksymalne, lokalnie uzyskane naprężenia ścinające na styku „pręt-spoina” osiągnęły 6,67 MPa.

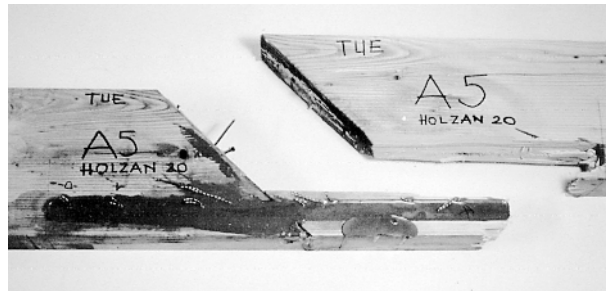
Belka A6. Belka ta uległa zniszczeniu w strefie połączenia blachy stalowej i kompozycji epoksydowej. Rysa niszcząca powstała w drewnie, na wysokości dolnej krawędzi blachy, tam, gdzie wystąpiły maksymalne naprężenia rozciągające. W końcowym etapie obciążania drewno uległo całkowitemu rozwarstwieniu na całej wysokości przekroju, rys. 3.10. Otrzymano siłę niszczącą $F_n = 40,6$ kN.

Rozkłady odkształceń w drewnie, w środku rozpiętości poszczególnych elementów belkowych, zamieszczono na rysunkach 3.11-3.15.

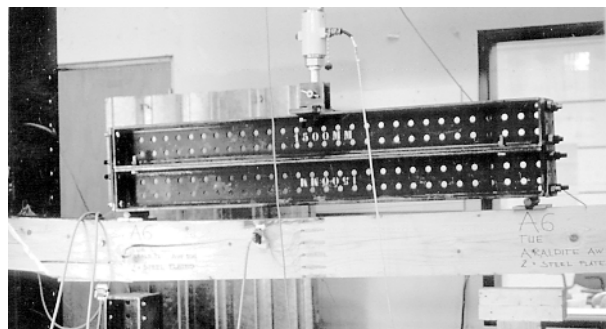
Na rysunkach 3.16-3.20 zestawiono rozkłady naprężeń normalnych w elementach wzmacniających połączenia klejowe dla poszczególnych, badanych belek. W jednym przypadku ograniczono zakres wykresu do poziomu siły obciążającej 0,7 F_n (belka A6), ze względu na przekroczoną w elemencie wzmacniającym (blasze) granicę plastyczności i nieproporcjonalny wzrost odkształceń przy wyższym poziomie obciążenia.



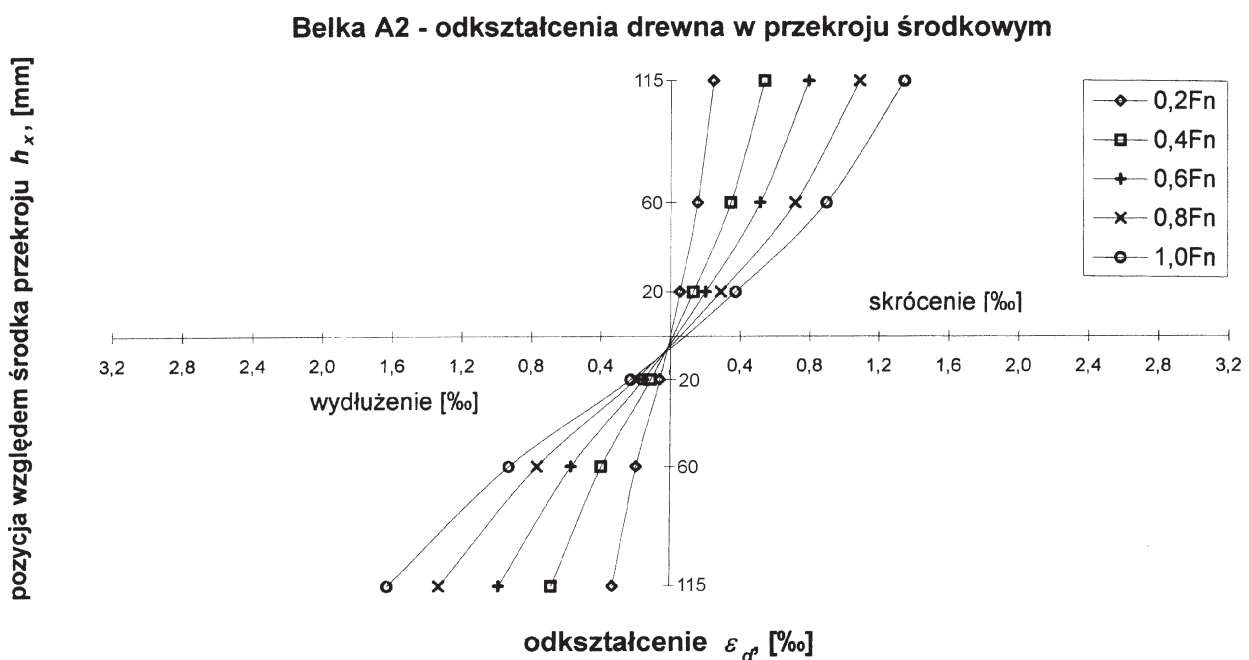
Rys. 3.8. Widok zniszczonego elementu A4



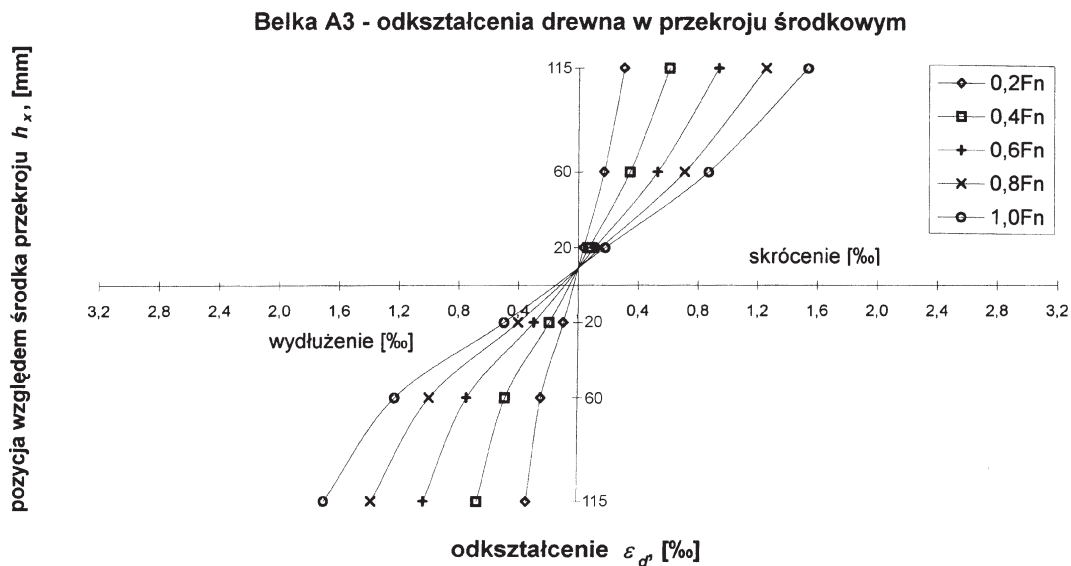
Rys. 3.9. Fragment zniszczonego elementu A5



Rys. 3.10. Widok zniszczonego elementu A6



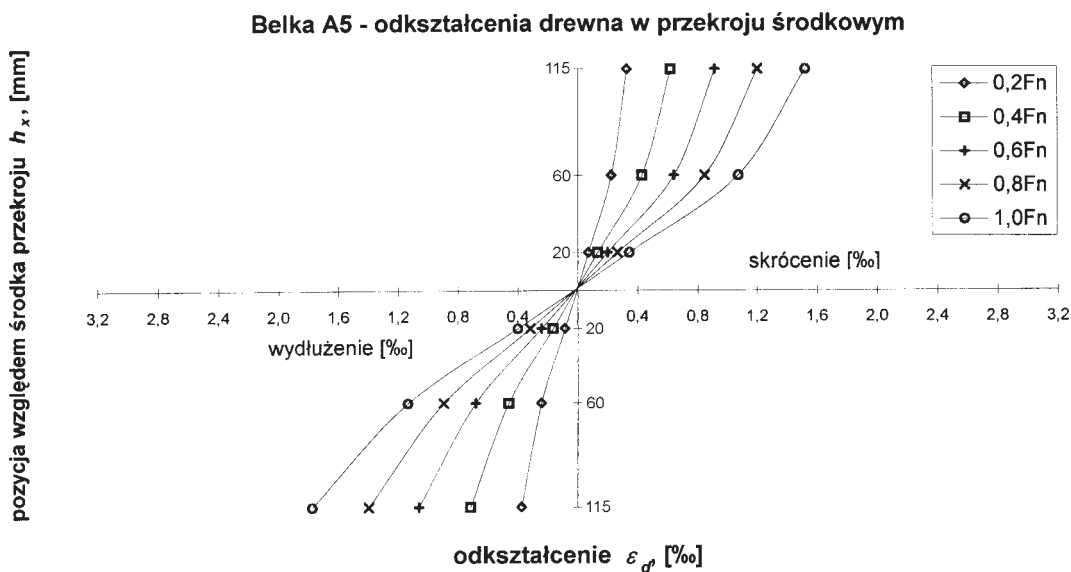
Rys. 3.11. Odkształcenia drewna w środku rozpiętości belki A2. F_n – siła niszcząca



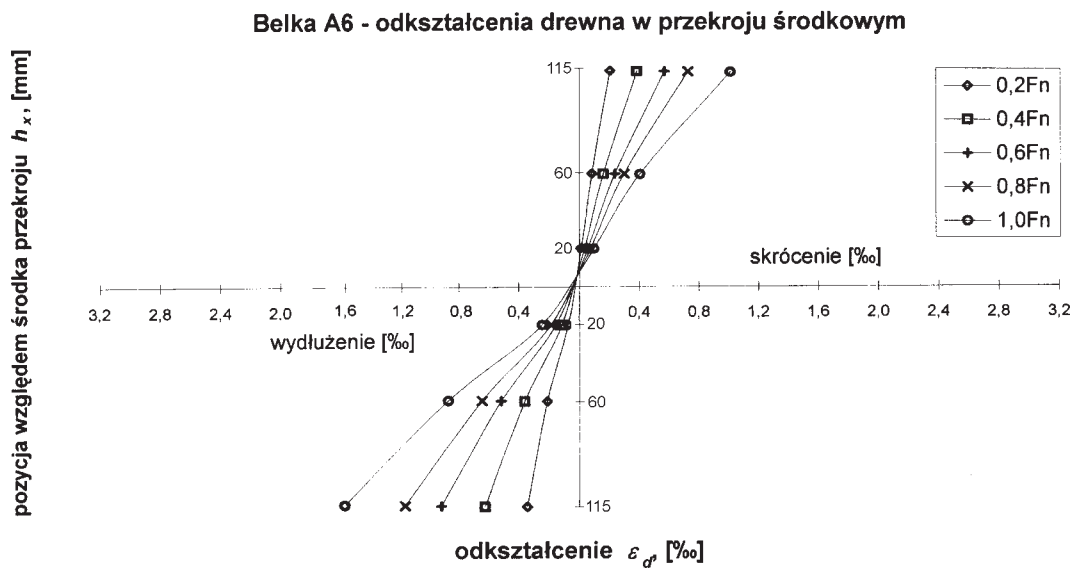
Rys. 3.12. Odkształcenia drewna w środku rozpiętości belki A3. F_n – siła niszcząca



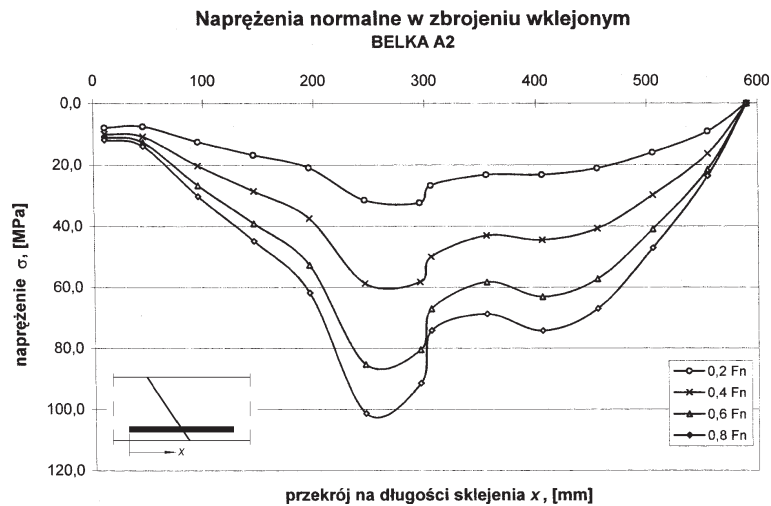
Rys. 3.13. Odkształcenia drewna w środku rozpiętości belki A4. F_n – siła niszcząca



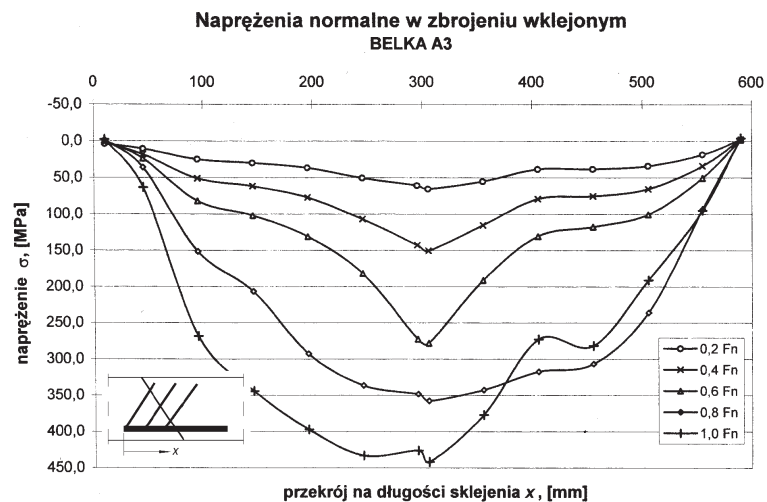
Rys. 3.14. Odkształcenia drewna w środku rozpiętości belki A5. F_n – siła niszcząca



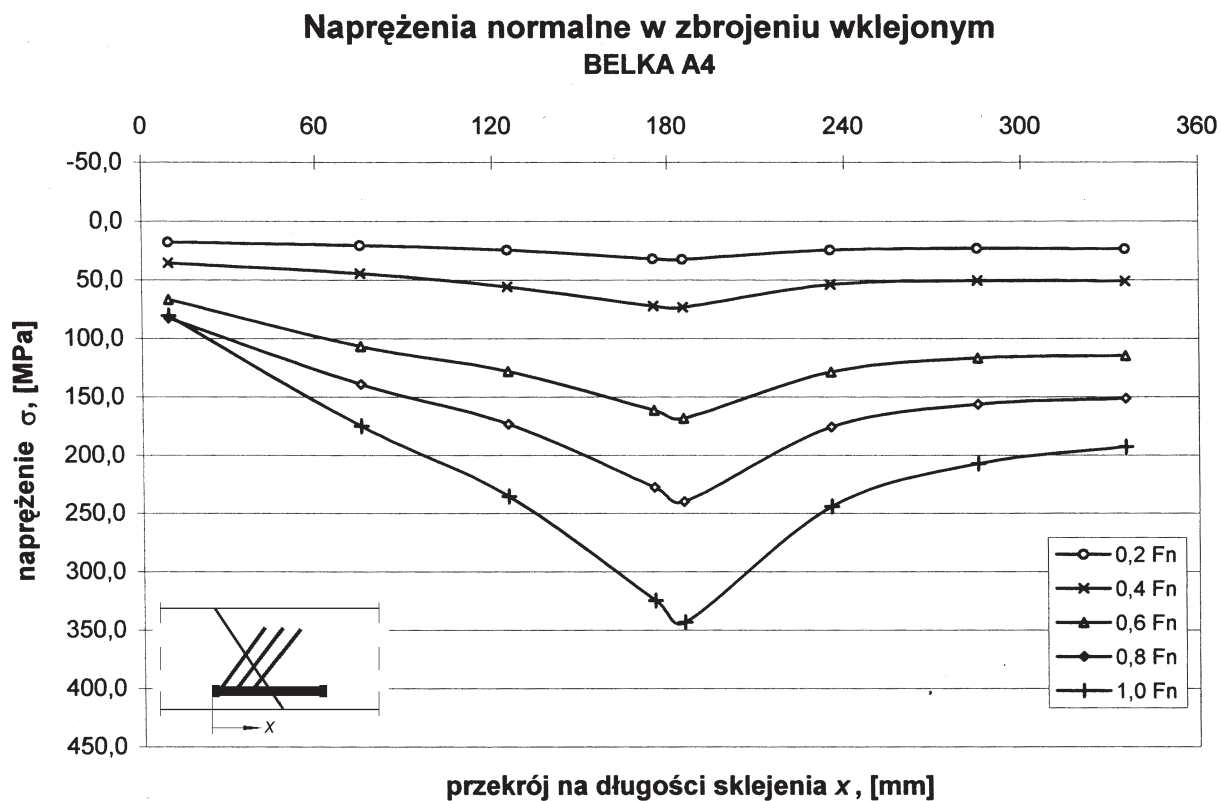
Rys. 3.15. Odkształcenia drewna w środku rozpiętości belki A6. F_n – siła niszcząca



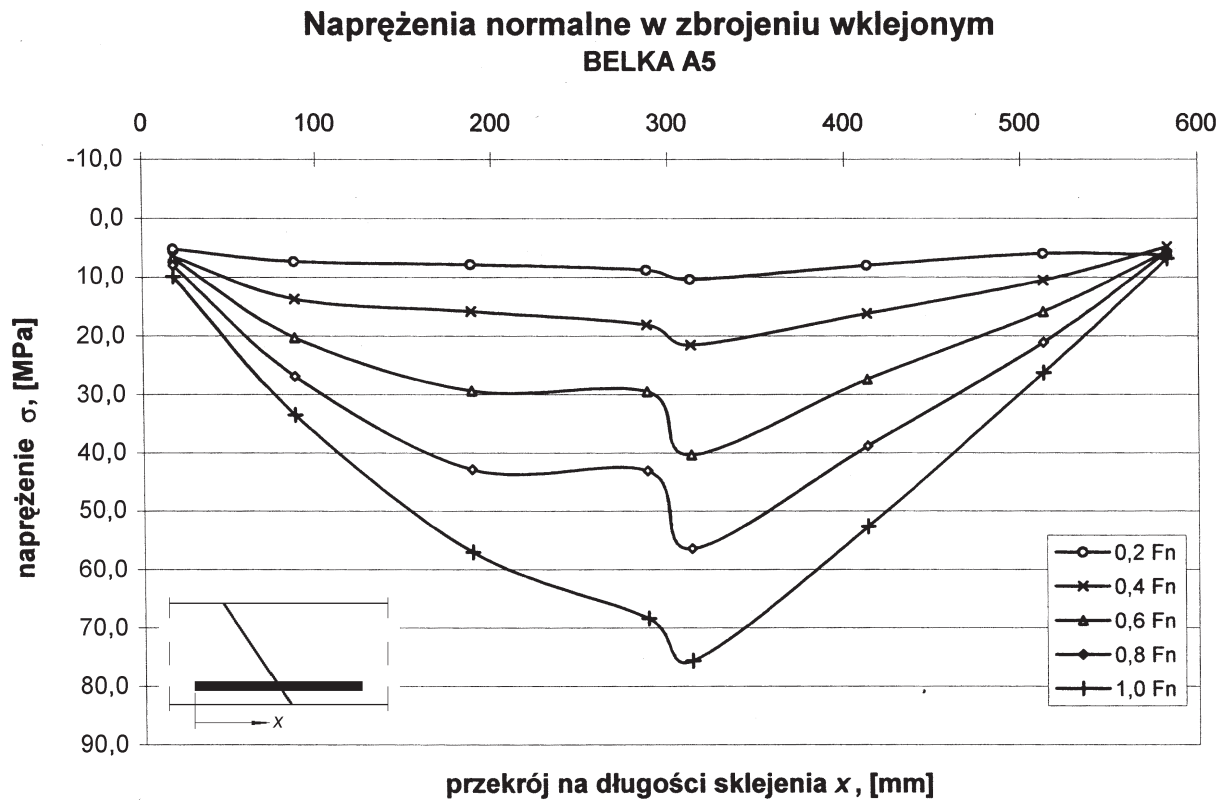
Rys. 3.16. Naprężenia normalne na długości wklejenia zbrojenia – belka A2. F_n – siła niszcząca



Rys. 3.17. Naprężenia normalne na długości wklejenia zbrojenia – belka A3. F_n – siła niszcząca



Rys. 3.18. Napężenia normalne na długości wklejenia zbrojenia – belka A4. F_n – siła niszcząca



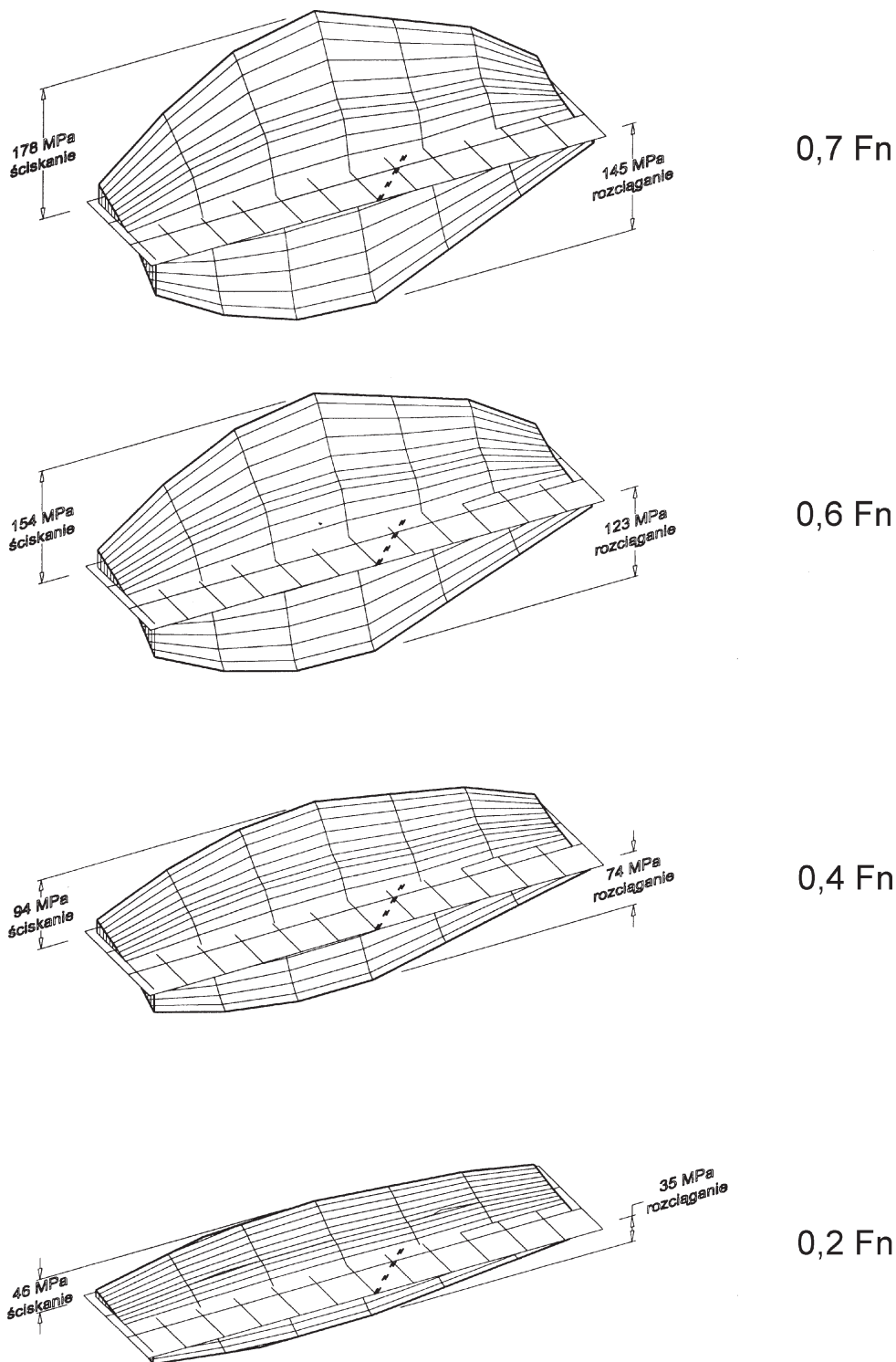
Rys. 3.19. Napężenia normalne na długości wklejenia zbrojenia – belka A5. F_n – siła niszcząca

3.3. Analiza wyników. Wnioski

Analizując przedstawione wyniki badań sformułowano następujące wnioski szczegółowe:

1. Badania wykazały przydatność klejonych kompozycji epoksydowych do wytworzenia połączeń konstrukcyjnych w strefach przypodporowych rehabilitowanych belek zginanych. W wię-

szości badanych belek uzyskano odtworzenie nośności i sztywności pierwotnej, a połączenia klejowe wraz z elementami wzmacniającymi brały udział w dystrybucji sił w zespolonych przekrojach już od początkowych wartości obciążenia. Ze sposobów rehabilitacji stref przypodporowych prezentowanych w poz. 2 należy jedynie odrzucić sposób



Rys. 3.20. Rozkłady naprężeń normalnych w blasze – belka A6. F_n – siła niszcząca

badany na modelu B6, często stosowany w latach 1850-1939.

2. Pomimo użycia różnorodnych elementów wzmacniających połączenie klejowe (pręty stalowe żebrowane, gładkie, pręty GR) oraz różnych kompozycji epoksydowych, uzyskano zbliżone wyniki co do nośności i sztywności dla belek A3 (2 żebrowane pręty stalowe $\phi 14$ o $l = 600$ mm z przyspawanymi „żebkami”, żywica *Araldite AW 106*) i A5 (2 pręty GR $\phi 20,4$ mm o $l = 600$ mm, żywica *Holzhan 20*) oraz A2 (2 żebrowane pręty stalowe $\phi 14$ o $l = 600$ mm, żywica *Araldite AW 106*). Porównanie niektórych parametrów dla belek, np.: A3 i A5 wygląda bowiem następująco:

- powierzchni ścinania
 $A_v^{A3} < A_v^{A5}$,
- wytrzymałości kompozycji klejowych
 $R_g^{A3} < R_g^{A5}$,
- wytrzymałości prętów
 $R_{m\phi 14}^{A3} > R_{m\phi 20,4}^{A5}$.

3. Analizując procesy zniszczenia odnotowano bardziej równomierną pracę belek A5 (pręty GR) i A2 (pręty stalowe żebrowane) w stosunku do belek A3, A4 (pręty stalowe z elementami ukośnymi) czy A6 (blachy stalowe). Związane to było, prawdopodobnie, z dłuższą długością zakotwienia, co dało efekt bardziej „płynnej” dystrybucji naprężeń w łączonych elementach.

4. Najślabszym ogniwem połączenia klejowego „element wzmacniający – klej – drewno” we wszystkich badanych przypadkach okazało się drewno – zniszczenie następowało z reguły w przekroju drewnianym lub w strefie przyskleinowej.

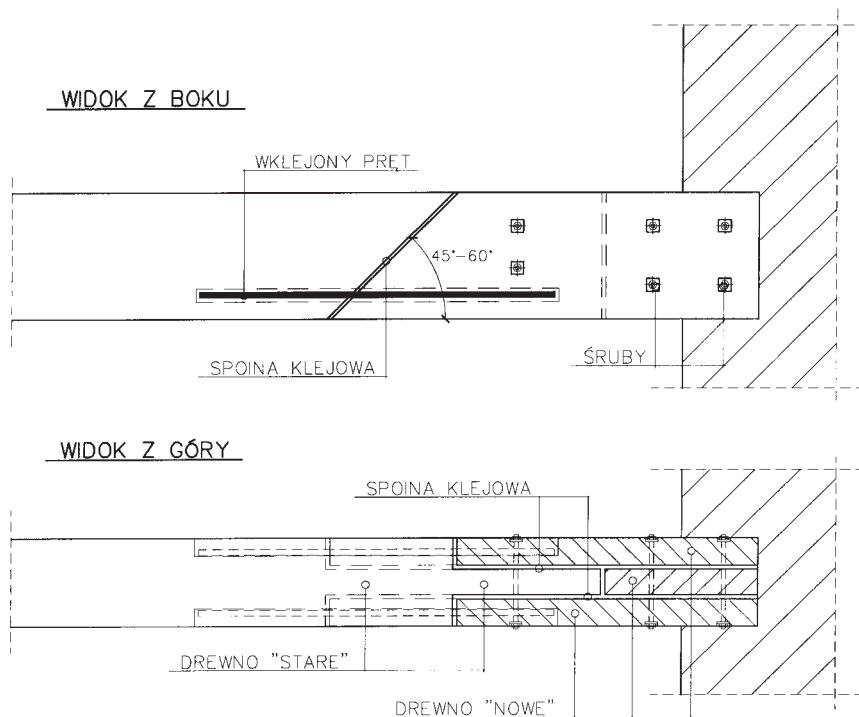
5. Lokalnie uzyskiwane, maksymalne naprężenia ścinające połączenie klejowe, wyznaczone na styku „pręt-spoina”, były zbliżone do średniej wytrzymałości na ścinanie (wzdłuż włókien) drewna ustalonej w badaniach na 7,47 MPa.

6. Obserwowano znaczny udział elementów wzmacniających połączenia w przenoszeniu obciążeń. Wyznaczone naprężenia sięgały, w niektórych przypadkach, granic wytrzymałości użytych materiałów (pręty stalowe krótkie oraz blachy – belki A3, A4, A6).

7. Obserwowane w belkach wzmocnionych przy użyciu prętów z „żebkami” ukośnymi, rozkłady naprężeń normalnych świadczą o występującym wpływie momentu zginającego na naprężenia normalne w pręcie. Powodowało to lokalne, dodatkowe naprężenia w środkowej strefie połączenia. Belki te miały także większą sztywność w stosunku do belek wzmocnionych przy użyciu prętów bez „żeber”. Bazując na otrzymanych wynikach, na rys. 3.21 zaproponowano sposób łączenia przekroju pierwotnego belki z nowym.

8. W belkach z połączeniami klejowymi wzmocnionymi prętami stalowymi z przyspawanymi „żebkami” ukośnymi (belki A3 i A4) zaobserwowano przesunięcie osi obojętnej względem środka przekroju i zmniejszenie wysokości strefy ścisanej drewna podczas całego procesu obciążania (rys. 3.12-3.13). Zjawisko to tłumaczyć można znaczną dyslokacją naprężeń pomiędzy obydwoma strefami przy zastosowanym typie zbrojenia.

9. Na podstawie uzyskanych nośności oraz obrazów zniszczeń badanych modeli wydaje się, że za generalnie korzystniejsze należy uznać wzmocnienia belek drewnianych, w których długości zakotwień elementów wzmacniających, l_z , przekraczają 300 mm.



Rys. 3.21. Przykładowe rozwiązanie połączenia klejowego „drewno-pręt stalowy” w strefie przypodporowej rehabilitowanej belki zginanej