

ARNOLD WILCZYŃSKI, LESZEK CYSEWSKI  
WSP w Bydgoszczy

PROBA WYZNACZENIA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ W DREWNIANYM ZŁĄCZU KLEJO-  
WYM METODĄ ELEKTRYCZNEJ TENSOMETRII OPOROWEJ

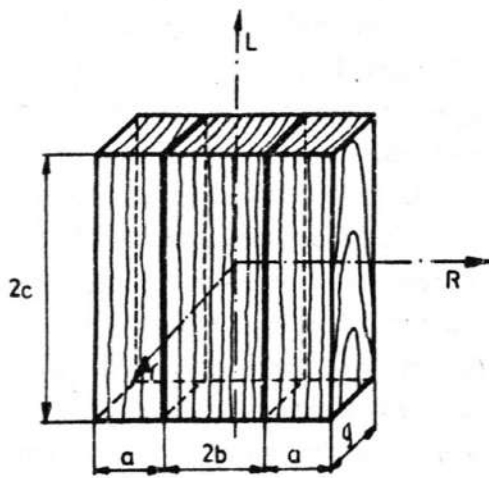
1. Wprowadzenie

Znajomość stanu naprężenia w złączu konstrukcyjnym umożliwia prawidłowe obliczenia wytrzymałościowe i w efekcie optymalne zaprojektowanie złącza. W przypadku złącz klejowych drewnianych elementów konstrukcyjnych brak jest, jak dotychczas, bardziej wnikliwych badań dotyczących odkształceń sprężystych i naprężeń w tych złączach. Przyczyną tego jest duży stopień trudności zagadnienia, wynikający z niejednorodnej budowy drewna i zmienności jego właściwości fizyko-mechanicznych oraz znacznej liczby czynników, do których m.in. zaliczyć można właściwości sprężyste drewna i spoiny klejowej, kształt i wymiary złącza, wzajemny układ włókien i słoń rocznych w łączonych elementach.

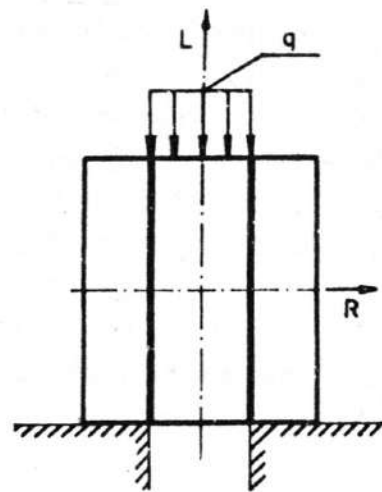
Biorąc pod uwagę duże, podkreślane przez M.Zenktelera [8] znaczenie praktyczne tego typu badań, podjęto próbę eksperymentalnego określenia rozkładu naprężeń w wybranym złączu klejowym. Do pomiaru odkształceń, będących podstawą określenia naprężeń w złączu, zastosowano metodę elektrycznej tensometrii oporowej. Jak bowiem wykazały badania A.Korzeniowskiego [3] oraz jednego z autorów [7], metoda ta może być stosowana do pomiaru odkształceń w elementach drewnianych.

## 2. Cel i zakres badań

Przedmiotem badań jest złącze klejowe typu próbka blokowa dwucięta, przedstawione na Rys. 1. Elementy złącza wykonane z drewna bukowego, sklejone są równoległowłókniste płaszczyznami stycznymi za pomocą kleju polioctanowinylowego "Wikol". Elementy boczne układu mają jednakową szerokość  $a$ , tak że jest on symetryczny względem płaszczyzny  $LT$ . Na Rys. 2. przedstawiono sposób podparcia i obciążenia próbki, zapewniający stan ścinania wzdłuż spoin klejowych.



Rys. 1. Próbką blokowa dwucięta



Rys. 2. Schemat podparcia i obciążenia próbki

Podstawowym celem badań jest określenie rozkładu naprężeń wzdłuż spoiny klejowej przy statycznym obciążeniu próbki siłami wywołującymi jedynie odkształcenia sprężyste. Ponadto celem badań jest sprawdzenie przydatności zastosowanych układów tensometrów /rozet tensometrycznych/ do wyznaczania naprężeń w przypadku płaskiego stanu naprężenia występującego w elemencie drewnianym.

Przyjęto następujące wymiary próbek: wysokość  $2c = 60$  mm, grubość  $q = 13,3$  mm, szerokość części środkowej  $2b = 20$  mm, szerokość części bocznych  $a = 10$  mm /próbka typu I/  $1a = 30$  mm /próbka typu II/. Tak więc szerokość  $a$  części bocznych próbki jest czynnikiem zmiennym. Jako stałe przyjęto: gęstość  $10,69$  g/cm<sup>3</sup>, właściwości sprężyste drewna, wilgotność drewna  $17\%$  warunki zewnętrzne panujące podczas pomiarów.

### 3. Metodyka badań

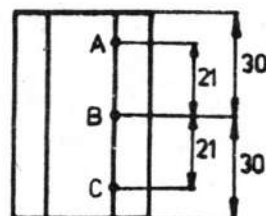
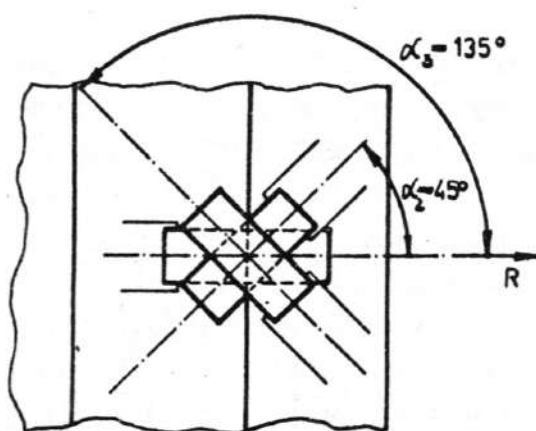
Obciążona zgodnie z Rys. 2 próbka może być rozpatrywana jako tarcza, a więc element charakteryzujący się płaskim stanem naprężenia wyznaczonym przez płaszczyznę promieniową  $RL$ . W celu posłużenia się równaniami teorii sprężystości, dotyczącymi tego stanu naprężenia, przyjęto następujące założenia: 1. Drewno jest ciałem jednorodnym; 2. W zastosowanym w badaniach zakresie obciążeń zachowuje się jak ciało liniowo sprężyste; 3. Anizotropia jego właściwości sprężystych opisana jest modelem ortotropowym [1,2,4,6]; 4. Spoina klejowa ze względu na swą bardzo małą grubość nie wpływa w istotny sposób na stan odkształceń i naprężeń w tarczy. Założenia 1. i 4. pozwalają rozpatrywać próbkę jako jednorodną tarczę drewnianą.

Zgodnie z prawami teorii sprężystości składowe  $\epsilon_R, \epsilon_L, \delta_{RL}$  odkształcenia w płaszczyźnie  $RL$  mogą być wyznaczone przez pomiar odkształceń  $\epsilon_{\alpha}$  w trzech dowolnych kierunkach leżących w tej płaszczyźnie i tworzących kąty  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  z osią  $R$ . Umożliwiają to związki [5]:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\alpha_1} &= \epsilon_R \cos^2 \alpha_1 + \epsilon_L \sin^2 \alpha_1 + \delta_{RL} \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \\ \epsilon_{\alpha_2} &= \epsilon_R \cos^2 \alpha_2 + \epsilon_L \sin^2 \alpha_2 + \delta_{RL} \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 \\ \epsilon_{\alpha_3} &= \epsilon_R \cos^2 \alpha_3 + \epsilon_L \sin^2 \alpha_3 + \delta_{RL} \sin \alpha_3 \cos \alpha_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Jak zaznaczono w p.1., do pomiaru odkształceń zastosowano metodę elektrycznej tensometrii oporowej. Posłużono się tensometrami kratowymi typu RL 120/10 o bazie pomiarowej 10 mm, rezys-

tancji nominalnej  $120 \Omega$  i współczynnika czułości odkształceniowej  $k = 2,15$ . Z czujników tych, poprzez naklejenie ich na siebie w sposób przedstawiony na Rys. 3, tworzą rosety tensometryczne umożliwiające dokonanie pomiaru odkształceń  $\epsilon_{\alpha}$  w trzech kierunkach określonych kątami  $0; 45^{\circ}$  i  $135^{\circ}$ . Ze względu na wielkość roset, ilość punktów pomiarowych na długości spoiny klejowej ograniczona jest do trzech. Ich rozmieszczenie przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 3. Schemat rosety tensometrycznej

Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych próbki

Dla założonych wartości kątów otrzymujemy na podstawie równań (1) następujące zależności:

$$\epsilon_R = \epsilon_{\alpha 1}, \quad \epsilon_L = \epsilon_{\alpha 2} + \epsilon_{\alpha 3} - \epsilon_{\alpha 1}, \quad \delta_{RL} = \epsilon_{\alpha 2} - \epsilon_{\alpha 3} \quad (2)$$

Ze względu na przyjęcie ortotropowego modelu właściwości sprężystych drewna, związki między składowymi  $\epsilon_R, \epsilon_L, \delta_{RL}$  stanu odkształcenia a składowymi  $\sigma_R, \sigma_L, \tau_{RL}$  stanu naprężenia przyjmują postać [4,6]:

$$\varepsilon_R = \frac{1}{E_R} G_R - \frac{\nu_{LR}}{E_L} G_L, \quad \varepsilon_L = \frac{1}{E_L} G_L - \frac{\nu_{LR}}{E_L} G_R, \quad \delta_{RL} = \frac{\tau_{RL}}{G_{RL}} \quad (3)$$

gdzie:  $E_R$  i  $E_L$  są modułami Younga dla kierunku promieniowego R i wzdłużnego L,  $\nu_{LR}$  jest współczynnikiem Poissona wiążącym odkształcenia w kierunkach L i R przy obciążeniu w kierunku L,  $G_{RL}$  jest modułem ścinania odpowiadającym odkształceniu postaciowemu w płaszczyźnie RL. Na podstawie równań (3) otrzymujemy następujące wzory umożliwiające obliczenia naprężenia normalnego  $G_R$  i stycznego  $\tau_{RL}$  w wybranych punktach A, B, C spoiny klejowej:

$$G_R = \frac{E_R E_L}{E_L - \nu_{LR}^2 E_R} (\varepsilon_R + \nu_{LR} \varepsilon_L), \quad \tau_{RL} = \delta_{RL} G_{RL} \quad (4)$$

W celu spełnienia warunku stałej gęstości i stałych właściwości sprężystych drewna, wszystkie próbki, tzn. po trzy próbki typu I /a = 10 mm/ i typu II /a = 30 mm/ wykonano z jednego bala rdzeniowego. Należy dodać, że z tego samego bala wykonano również próbki do oznaczania stałych sprężystości drewna bukowego. Wyniki tych badań przedstawione są w pracy [7]. Przy tej samej wilgotności drewna równej 7 % uzyskano następujące wartości interesujących nas stałych sprężystości:  $E_R = 1700$  MPa,  $E_L = 14700$  MPa,  $\nu_{LR} = 0,45$ ,  $G_{RL} = 1300$  MPa. Ze względu na specyfikę badań starano się zachować w jak największym, możliwym do spełnienia stopniu założone kierunki włókien i słoń rocznych w elementach próbki oraz prostopadłość i równoległość odpowiednich płaszczyzn próbki.

Wykonane próbki blokowe dwucięte sezonowane były przez okres czterech tygodni. Przechowywano je w tym samym pomieszczeniu /laboratorium/, w którym następnie przeprowadzono badania tensometryczne. Przygotowanie próbek do badań, które nastąpiło po upływie okresu sezonowania polegało na: przygotowaniu powierzchni próbek do naklejenia czujników, naklejeniu tensometrów, dolutowaniu przewodów łączących, zabezpieczeniu czujników przed wpływem wilgoci. Zabiegi te prowadzone były zgodnie z ogólnymi zasadami przygotowania próbek do badań tensometrycznych

[5]. Po następnych dwóch tygodniach przechowywania próbek w laboratorium przystąpiono do badań.

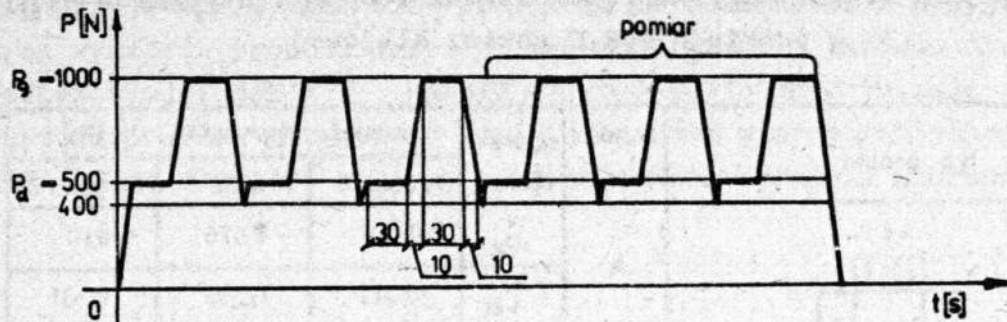
Próbki obciążano w maszynie wytrzymałościowej typu ZD-10/90, mocując je w specjalnie do tego celu skonstruowanym przyrządzie. Stosowano zakres pomiarowy 0-2 kN. Pomiaru odkształceń

$\epsilon_{\alpha}$  dokonywano za pomocą aparatury tensometrycznej firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Z używanego zestawu serii 3000, przystosowanego do pomiaru różnych wielkości mechanicznych, wykorzystywano następujące moduły funkcjonalne: wzmacniacze pomiarowe częstotliwości nośnej KWS 3070, przełącznik punktów pomiarowych UR 3315, zespół wskazań cyfrowych DA 3415A. Pomiarów dokonywano w układzie półmostka wykorzystując zakres pomiarowy aparatury równy 2000  $\mu\text{m}/\text{m}$  przy rozdzielczości 1  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Przyjęto następujące wartości dolnego  $P_d$  i górnego  $P_g$  obciążenia pomiarowego:  $P_d = 500 \text{ N}$ ,  $P_g = 1000 \text{ N}$ . Biorąc pod uwagę wyniki badań wstępnych, które wykazały, że siła niszcząca złącza ma wartość około 25 kN, można przyjąć, iż górne obciążenie pomiarowe wywołuje w próbce wyłącznie odkształcenia sprężyste. Próbkę obciążano sześciokrotnie w sposób przedstawiony na Rys. 5. Podczas trzech ostatnich cykli obciążenia mierzono wartości odkształceń odpowiadające przyłożonym siłom  $P_d$  i  $P_g$ .

Wartości odkształceń wywołanych wzrostem obciążenia o  $\Delta P = 500 \text{ N}$  wyznaczano odejmując od wartości odkształcenia odczytanej przy obciążeniu  $P_g$  wartość odczytaną przy obciążeniu  $P_d$  i obliczając średnią arytmetyczną z trzech dokonanych pomiarów.

Obliczone w ten sposób wielkości  $\epsilon_{\alpha 1}$ ,  $\epsilon_{\alpha 2}$ ,  $\epsilon_{\alpha 3}$  służyły do wyznaczenia za pomocą zależności (2) składowych stanu odkształcenia  $\epsilon_R$ ,  $\epsilon_L$ ,  $\epsilon_{\alpha}$ . Następnie na podstawie równań (4) wyznaczano wartości naprężeń normalnych  $\sigma_R$  i stycznych  $\tau_{\alpha L}$  w poszczególnych punktach pomiarowych spoiny klejowej.



Rys. 5. Schemat obciążania próbki

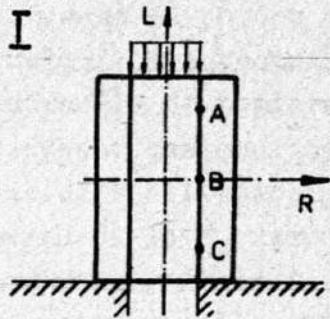
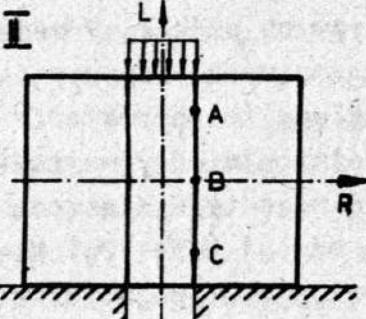
#### 4. Wyniki badań i ich analiza

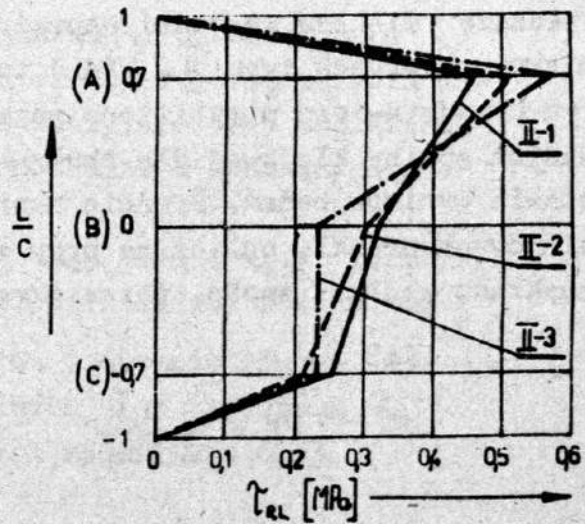
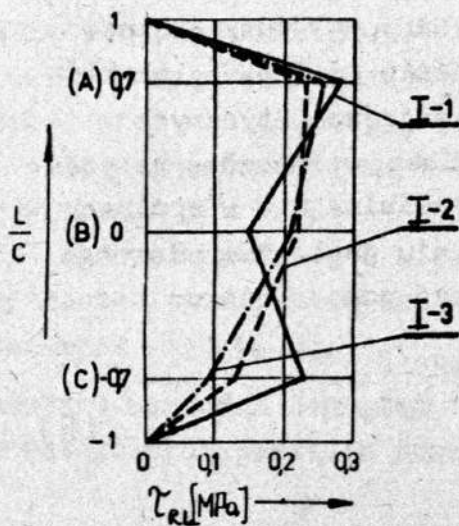
Wyniki badań zestawiono w Tabl. 1. Widoczny jest duży ich rozrzut dla poszczególnych punktów pomiarowych próbek. Przede wszystkim dotyczy to wartości naprężeń normalnych. W przypadku interesujących nas szczególnie, ze względu na charakter obciążenia złącza, naprężeń stycznych, różnice między wartościami tych naprężeń w badanych próbkach danego typu mieszczą się w większości przypadków w przedziale od 4,1 % do 17,7 %, a w skrajnym, dotyczącym porównania naprężeń występujących w punkcie C próbek 1. i 3. typu I dochodzą do 61,1, %.

Porównując wyniki uzyskane dla próbek I i II stwierdzamy znacznie większe wartości naprężeń stycznych w punktach pomiarowych próbek typu II. Widać to wyraźnie na Rys. 6, na którym przedstawiono przybliżone rozkłady naprężeń stycznych wzdłuż spoiny klejowej dla obu typów próbek, wyznaczone na podstawie wyników badań. Średnie naprężenie ścinające w spoinach klejowych próbki, obliczane przy założeniu jego równomiernego rozkładu wzdłuż spoin, można określić za pomocą wzoru:

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot 2c g} \quad (5)$$

Tabela 1. Wartości naprężeń normalnych  $\sigma_R$  i stycznych  $\tau_{RL}$  w punktach A.B.C spoiny klejowej

Typ próbki	Punkt pomiar.	Napężenia	Wartość naprężeń [MPa]		
			Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3
	A	$\sigma_R$	-0,133	-0,076	-0,117
		$\tau_{RL}$	0,282	0,235	0,261
	B	$\sigma_R$	-0,011	-0,002	-0,001
		$\tau_{RL}$	0,153	0,217	0,207
	C	$\sigma_R$	0,026	0,046	0,014
		$\tau_{RL}$	0,229	0,125	0,090
	A	$\sigma_R$	-0,149	-0,152	-0,174
		$\tau_{RL}$	0,462	0,510	0,563
	B	$\sigma_R$	0,008	-0,012	-0,024
		$\tau_{RL}$	0,315	0,302	0,230
	C	$\sigma_R$	0,086	0,077	0,028
		$\tau_{RL}$	0,254	0,212	0,233



Rys. 6. Rozkłady naprężeń ścinających  $\tau_{RL}$  wzdłuż spoiny klejowej



Dla przyjętego w badaniach przyrostu  $\Delta P$  obciążenia i przyjętych wymiarów próbek, przyrost tego naprężenia, zarówno dla próbek typu  $\underline{I}$  jak i  $\underline{II}$ , osiąga wartość 0,313 MPa. Tą samą wartość powinna przyjmować średnia całkowita mierzonych naprężeń  $\tau_{RL}$  na długości spoiny, a więc średnia wyrażona wzorem:

$$\bar{\tau}_{RL} = \frac{1}{2c} \int_{-c}^{+c} \tau_{RL} dL \quad (6)$$

Z analizy przedstawionych na Rys. 6 rozkładów naprężeń  $\tau_{RL}$  wynika jednak, że średnia ta jest zbliżona do poziomu 0,313 MPa tylko dla próbek typu  $\underline{II}$ . W przypadku próbek typu  $\underline{I}$  określone na podstawie pomiarów wartości naprężeń  $\tau_{RL}$  są z pewnością zbyt niskie.

Pomimo małej, wynikającej z niewielkiej liczby punktów pomiarowych, dokładności wykresów naprężeń stycznych, pozwalają one na określenie charakteru rozkładu tych naprężeń wzdłuż spoiny klejowej. W pobliżu górnego końca spoiny /punkt A/ są one większe niż w pobliżu dolnego /punkt C/, przy czym stopień nierównomierności rozkładu naprężeń wyrażony przez stosunek ich wartości w symetrycznych względem środka spoiny punktach A i C jest większy dla próbek typu  $\underline{II}$ . Średnia wartość tego stosunku dla trzech próbek typu  $\underline{II}$  wynosi 2,2, natomiast dla próbek typu  $\underline{I}$  - 1,7. Ponieważ równomierność rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej decyduje o jej wytrzymałości na ścinanie, można stwierdzić, że wytrzymałość ta powinna być wyższa dla próbek typu  $\underline{I}$ , a więc próbek o mniejszej szerokości elementów bocznych.

Duże rozrzuty wyników badań i zbyt niskie wartości naprężeń dla próbek typu  $\underline{I}$ , są, jak się wydaje, spowodowane następującymi czynnikami:

- a/ niejednorodnością drewna powodującą trudny do stwierdzenia i różny dla poszczególnych próbek oraz punktów spoiny udział w danym polu pomiarowym drewna wczesnego i znacznie różniącego się właściwościami sprężystymi drewna późnego,
- b/ naprężeniami własnymi powstałymi w spoinie i jej otoczeniu

w trakcie zestalania się spoiny, z pewnością różnymi co do wartości i rozkładu w poszczególnych próbkach,

c/ wpływem spoiny klejowej, który pominięto przy obliczaniu naprężeń na podstawie zmierzonych odkształceń; ze względu na nierównomierność grubości spoiny jej wpływ na wartości naprężeń jest różny w poszczególnych punktach spoiny i dla poszczególnych próbek.

d/ niedoskonałością wykonania próbek powodującą nierównomierny rozkład obciążenia wzdłuż ich grubości  $g$  i szerokości  $2b$  części środkowej, co może być przyczyną np. mniejszych wartości naprężeń na przedniej, pomiarowej ścianie próbki, niż na ścianie tylnej.

Wpływ czynnika a/ jest możliwy do zmniejszenia przez zastosowanie tensometrów o większej bazie pomiarowej. Należy jednak wziąć pod uwagę, że spowoduje to powiększenie pola pomiarowego rozety i w związku z tym wyniki pomiarów będą bardziej odbiegały od rzeczywistych odkształceń w punkcie pomiarowym. Również wpływ czynnika d/ może być w znacznym stopniu wyeliminowany przez pomiar odkształceń w bliźniaczych, określonych tą samą współrzędną  $L/c$ , punktach spoiny leżących na przedniej i tylnej ścianie próbki oraz uśrednienie wartości tych odkształceń. Podobnie poprawę sytuacji powinien przynieść pomiar odkształceń w odpowiadających sobie punktach obu spoin klejowych.

Realizacja powyższych postulatów wymagałaby zwiększenia wymiarów próbek i to w takim stopniu, który pozwoliłby także na przyjęcie większej ilości punktów pomiarowych. Dałoby to możliwość uzyskania dokładniejszego obrazu rozkładu naprężeń. Autorzy przewidują kontynuację badań z uwzględnieniem tej propozycji.

## 5. Wnioski

Na podstawie wyników badań można sformułować następujące wnioski.

1. Zastosowany układ rozety tensometrycznej może być wykorzystany do wyznaczania naprężeń w elemencie drewnianym.
2. Rozkład naprężeń stycznych wzdłuż spoiny klejowej drewnianej próbki blokowej dwuciętej charakteryzuje się tym, że naprężenia w górnej strefie spoiny mają wyższe wartości niż w pozostałych strefach, przy czym wspomniany rozkład jest bardziej równomierny dla próbek o mniejszej szerokości elementów bocznych.
3. W celu zmniejszenia oddziaływania czynników wpływających ujemnie na powtarzalność i dokładność wyników należy:
  - a/ zwiększyć wymiary próbek,
  - b/ dokonywać pomiarów odkształceń w odpowiadających sobie punktach spoiny, leżących na przeciwległych ściankach próbki i na obu spoinach.

## LITERATURA

- [1] Aszkenazi E.K., Ganow E.B., Anizotropia konstrukcyjnych materiałów, Maszynostrojenie, Leningrad 1980
- [2] Keylwerth R., Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer, VDI - Forschungsheft 430, Düsseldorf 1951
- [3] Korzeniowski A., Badania możliwości pomiaru odkształceń układu drewno-klej za pomocą oporowych czujników tensometrycznych umieszczonych w skleinie, Folia Forestalia Polonica seria B., 1965 nr 6, s.181-269
- [4] Lechnicki S.G., Teoria uprugosti anizotropnowo tieła, Nauka, Moskwa 1977
- [5] Roliński Z., Tensometria oporowa-podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań, Warszawa 1981
- [6] Wilczyński A., Model anizotropii właściwości sprężystych drewna. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych /w druku/

- [7] Wilczyński A., Badanie właściwości sprężystych drewna bukowego, Maszynopis, Katedra Wychowania Technicznego WSP Bydgoszcz 1985
- [8] Zenkteler M., Kleje i klejenie drewna, Warszawa 1984