

ARNOLD WILCZYŃSKI  
MAREK GOGOLIN  
WSP w Bydgoszczy

## BADANIE WŁAŚCIWOŚCI SPRĘŻYSTYCH DREWNA SOSNY, BUKA I DĘBU

### 1. Wstęp

Pomimo konkurencji innych materiałów konstrukcyjnych drewno i tworzywa drzewne są nadal szeroko stosowane w wielu dziedzinach techniki, głównie w budownictwie i meblarstwie. Dzięki rozwojowi technik obliczeniowych możliwa jest dokładna analiza wytrzymałościowa konstrukcji drewnianych, jednak warunkiem jej poprawności jest m.in. znajomość właściwości sprężystych drewna i tworzyw drzewnych. Dlatego też właściwości te są przedmiotem ciągłego zainteresowania badaczy i projektantów konstrukcji drewnianych.

Zagadnienie sprężystości drewna jest bardziej złożone niż w przypadku większości innych materiałów konstrukcyjnych. Ze względu na swą budowę drewno cechuje się bowiem anizotropią właściwości mechanicznych, w tym i sprężystych, ponadto w związku z higroskopijnością drewna właściwości te zależą od jego wilgotności. Dodatkowo komplikuje sytuację nieuniknione występowanie różnych wad drewna.

Operuje się dwoma modelami anizotropii właściwości sprężystych drewna: transversalno-izotropowym (poprzecznie izotropowym) i ortotropowym. Pierwszy z nich charakteryzuje się pięcioma niezależnymi stałymi sprężystości, drugi - dziewięcioma, podczas gdy w przypadku ciał izotropowych, którymi jest większość materiałów konstrukcyjnych, właściwości sprężyste są określone tylko

przez dwie stałe sprężystości. Model ortotropowy właściwości sprężystych drewna jest przy tym bardziej dokładny, dlatego też operuje się nim w badaniach podstawowych tego tworzywa konstrukcyjnego.

Przeprowadzono już, począwszy od lat dwudziestych bieżącego stulecia, szereg badań mających na celu wyznaczenie kompletu stałych sprężystości drewna traktowanego jako ciało ortotropowe. Wyniki tych badań dla różnych gatunków drewna znajdującego się w stanie powietrzno-suchym przedstawione są m.in. w pracach (5,11,13,18). Niektóre z nich przytoczono też w niniejszym opracowaniu (tab. 8). Wyniki te cechuje duża rozbieżność. Wartości niektórych stałych sprężystości danego gatunku drewna uzyskane w różnych badaniach, na drewnie pochodzącym z różnych krajów, znacznie odbiegają od siebie, do tego stopnia, że ich różnice względne osiągają poziom 100 %. W Polsce nie przeprowadzono dotąd badań mających na celu wyznaczenie kompletu stałych sprężystości drewna pochodzenia krajowego. Należy przypuszczać, biorąc pod uwagę wyniki badań Goneta (8) nad modułem sprężystości w poprzek włókien wybranych gatunków drewna pochodzenia krajowego, że wartości stałych sprężystości tego drewna nie będą zbieżne z danymi literaturowymi uzyskanymi w badaniach zagranicznych.

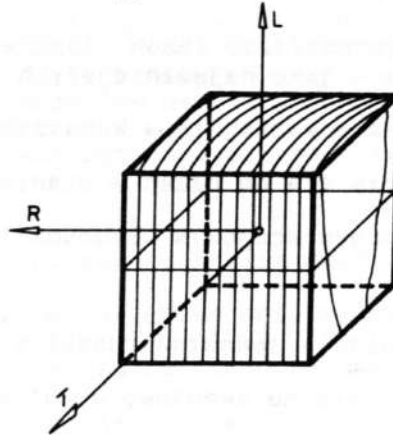
Uwzględniając z jednej strony rozbieżności w danych literaturowych, z drugiej - nieznaną właściwość sprężystych drewna pochodzenia krajowego, postanowiono przeprowadzić badania, których celem jest wyznaczenie właściwości sprężystych tego drewna traktowanego jako ciało ortotropowe dla jego kilku gatunków. Wybrano trzy gatunki mające w Polsce istotne znaczenie techniczne: drewno sosny jako przedstawicielki drzew iglastych, stosowane szeroko w konstrukcjach budowlanych oraz

drewno buka i dębu - jako najważniejszych krajowych drzew liściastych, stosowane powszechnie w konstrukcjach meblarskich. Ograniczono się przy tym do badań w stanie powietrzno-suchym odpowiadającym typowym krajowym warunkom temperaturowo-wilgotnościowym.

W celu osiągnięcia jednoznaczności w interpretacji badanych sprężystości opisano skrótowo model ortotropowy właściwości sprężystych drewna, po czym ustalono metodę wyznaczania kompletu stałych sprężystości związanych z tym modelem. W opisie badań zwrócono uwagę na przygotowanie próbek do badań, dobór zakresu ich obciążenia i sposób pomiaru ich odkształceń. Wyniki badań opracowano statystycznie, dokonując dodatkowo szacunku maksymalnych błędów pomiarowych. Przeprowadzono analizę uzyskanych wyników i porównano je z danymi literaturowymi.

## 2. Opis właściwości sprężystych drewna jako ciała ortotropowego

Przyjmuje się powszechnie (3, 4, 5, 11, 13, 17, 18, 24), że anizotropia właściwości sprężystych drewna jest zbliżona do tzw. modelu ortotropowego. Charakteryzuje się on istnieniem trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyzn symetrii sprężystej, czyli takich płaszczyzn, że w dwóch dowolnych kierunkach symetrycznych względem nich właściwości sprężyste materiału są jednakowe. W przypadku drewna płaszczyzny te są wyznaczone przez jego kierunki anatomiczne: wzdłużny  $L$ , promieniowy  $R$  i styczny  $T$  (rys. 1).



Rys. 1. Płaszczyzny symetrii sprężystych drewna: LR - promieniowa, LT- styczna, RT- poprzeczna

Zakładając, że drewno jest ciałem ciągłym, jednorodnym, liniowo sprężystym i ortotropowym, otrzymuje się (13, 17) - w układzie osi LRT - następujące związki między składowymi  $\varepsilon_L, \dots, \gamma_{LT}$  stanu odkształcenia i składowymi  $\sigma_L, \dots, \tau_{LT}$  stanu naprężenia:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_L &= \frac{1}{E_L} \sigma_L - \frac{\nu_{RL}}{E_R} \sigma_R - \frac{\nu_{TL}}{E_T} \sigma_T, \\ \varepsilon_R &= -\frac{\nu_{LR}}{E_L} \sigma_L - \frac{1}{E_R} \sigma_R - \frac{\nu_{TR}}{E_T} \sigma_T, \\ \varepsilon_T &= -\frac{\nu_{LT}}{E_L} \sigma_L - \frac{\nu_{RT}}{E_R} \sigma_R + \frac{1}{E_T} \sigma_T, \\ \gamma_{LR} &= \frac{1}{G_{LR}} \tau_{LR}, \quad \gamma_{RT} = \frac{1}{G_{RT}} \tau_{RT}, \quad \gamma_{LT} = \frac{1}{G_{LT}} \tau_{LT} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

przy czym:

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R}, \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}. \quad (2)$$

W powyższych równaniach występuje 12 stałych sprężystości:

- trzy moduły Younga  $E_i$  dla kierunków  $i = L, R, T$ ,
- sześć współczynników Poissona

$$\nu_{ij} = \frac{\text{odkształcenie jednostkowe wzdłuż osi } j}{\text{odkształcenie jednostkowe wzdłuż osi } i} \quad \text{przy równomier-}$$

nym naprężeniu normalnym w kierunku osi  $i$ ;  $i, j = L, R, T$ ;  
 $i \neq j$ ,

- trzy moduły ścinania  $G_{ij}$  w płaszczyznach  $ij$ , przy czym  
 $i, j = L, R, T$ ;  $i \neq j$ ;  $G_{ij} = G_{ji}$ .

Należy przy tym zauważyć, że w związku z zależnościami (2) tylko 9 z nich jest niezależnych.

Znając stałe sprężystości związane z kierunkami  $i, j$  ( $i, j = L, R, T$ ), można wyznaczyć stałe dotyczące innych kierunków uzyskanych w wyniku obrotu układu osi  $LRT$ . Odpowiednie zależności znajdują się w pracach (4, 11, 13, 17). Rozpatrując obrót układu współrzędnych wokół osi prostopadłej do płaszczyzny  $ij$ , otrzymuje się m.in. następujący związek (4, 13):

$$E_{ij}^{45} = 2 G_{ij} (1 + \nu_{ij}^{45}); \quad i, j = L, R, T, \quad i \neq j, \quad (3)$$

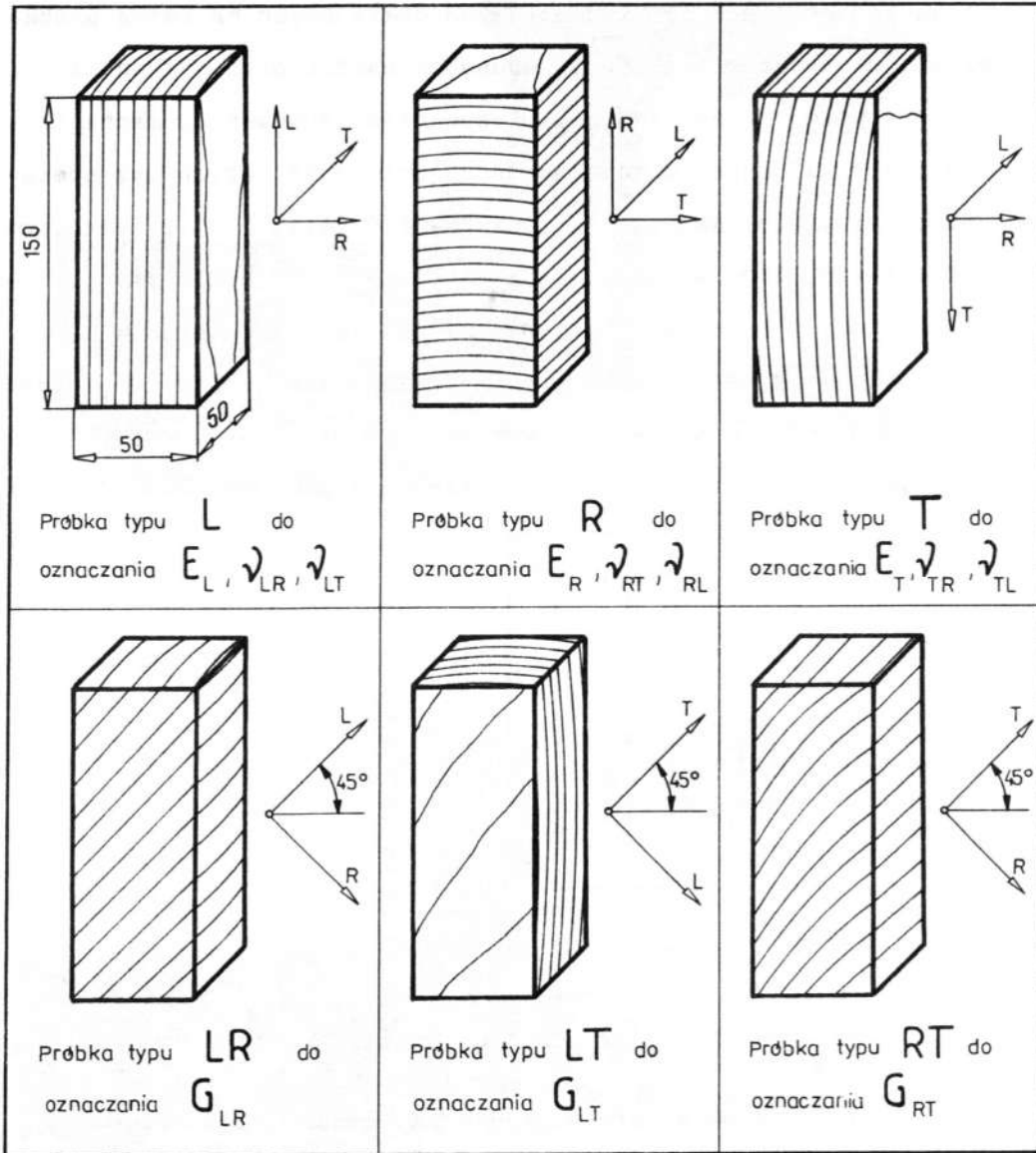
w którym  $E_{ij}^{45}$  i  $\nu_{ij}^{45}$  są modułami Younga i współczynnikami Poissona dla kierunków tworzących kąty  $45^\circ$  z osiami  $i$  oraz  $j$ . Związek ten jest wykorzystywany przy wyznaczaniu modułów ścinania drewna.

### 3. Metoda wyznaczania stałych sprężystości

Istnieje wiele metod wyznaczania wartości stałych sprężystości drewna, szczególnie jego modułu sprężystości przy zgina-

niu wzdłuż włókien. Najogólniej można je podzielić na statyczne i dynamiczne, zaliczając do tych ostatnich także metody ultradźwiękowe. Obszerne zestawienie źródeł literaturowych dotyczących różnych metod zawarte jest w monografii Dzbeńskiego (7), ponadto przeglądy tych metod znajdują się w pracach (3, 11, 14). Warto też wskazać na oryginalne metody wyznaczania niektórych stałych zastosowane w pracach (1, 2, 6, 9, 10, 15, 16, 23). Oznaczanie stałych sprężystości drewna objęto w wielu krajach normami. W Polsce obowiązują cztery normy (30, 31, 32, 33), przy czym wszystkie dotyczą jednej stałej sprężystości - modułu Younga w kierunku włókien. Wyznaczanie kompletu 12 stałych sprężystości zostało znormalizowane, jak wiadomo autorom, tylko w Związku Radzieckim (26, 27, 28, 29).

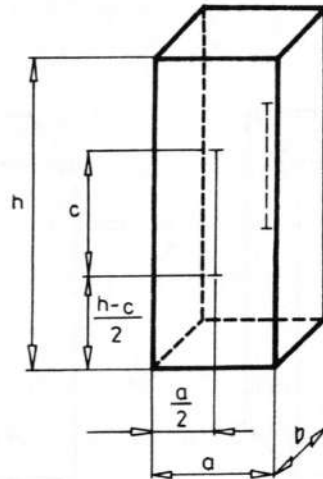
W wyniku analizy metod wyznaczania poszczególnych stałych sprężystości drewna za najodpowiedniejszą uznano metodę statycznego ściskania próbek prostopadłościennych wzorowaną na normach GOST (26, 27, 28, 29). Wykorzystuje się w niej 6 typów próbek przedstawionych na rys. 2, przy czym próbki typu L, R i T służą do oznaczania modułów Younga i współczynników Poissona, natomiast tzw. próbki diagonalne, czyli próbki typu LR, LT i RT, w których oś podłużna tworzy kąty  $45^\circ$  z dwoma kierunkami anatomicznymi drewna i jest jednocześnie prostopadła do trzeciego - do oznaczania modułów ścinania. Wszystkie próbki mają jednakowe wymiary, ponadto są obciążane w ten sam sposób i mierzy się te same ich odkształcenia. Ta jednolitość w oznaczaniu poszczególnych stałych jest niewątpliwie zaletą metody. Wyeliminowany został efekt skali a prosty kształt próbek ułatwia ich dokładne wykonanie.



Rys. 2. Próbki do oznaczania stałych sprężystości drewna

Dobierając sposób pomiaru odkształceń próbki, zdecydowano się na mierzenie bezwzględnych skróceń  $\Delta c$  i poszerzeń  $\Delta a$  i  $\Delta b$  próbek za pomocą tensometrii mechanicznej, rezygnując z alternatywnego pomiaru odkształceń jednostkowych tensometrami elektrooporowymi. O wyborze tym zdecydowała duża liczba próbek

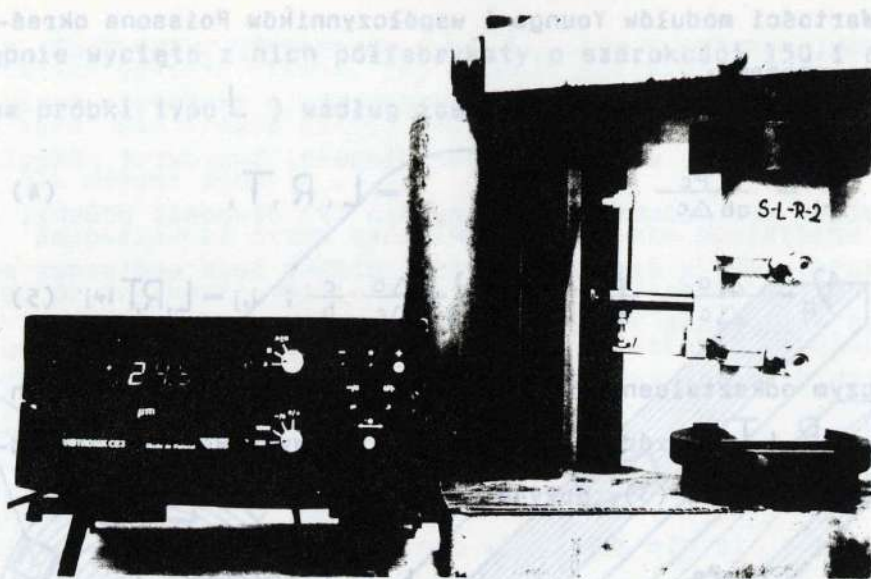
przewidywanych do badań, łącznie około 300 sztuk - co przy kilku tensometrach elektrooporowych naklejanych na każdą próbkę czyniłoby badania tym drugim sposobem bardzo pracochłonnymi i kosztownymi. W związku z zastosowaniem tensometrii mechanicznej i wynikającą stąd potrzebą przyjęcia dość dużych baz pomiarowych przyjęto, wzorując się na PN-58/D-04115 (30) i badaniach Pożgaja (19, 20), wymiary próbek równe 50 x 50 x 150 mm. Usytuowanie bazy c pomiaru skrócenia  $\Delta c$  próbki przedstawiono na rys. 3, pomiar poszerzeń  $\Delta a$  i  $\Delta b$  przewidziano w poziomej płaszczyźnie w połowie wysokości próbki, bazując na wymiarach  $a$  i  $b$  przekroju poprzecznego w tej płaszczyźnie.



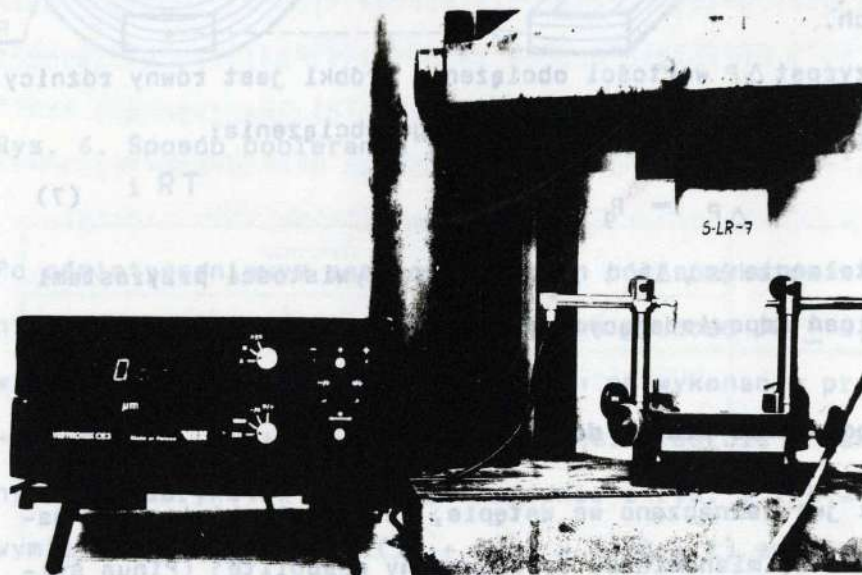
Rys. 3. Usytuowanie bazy pomiaru skrócenia próbki

Do pomiaru odkształceń próbki zastosowano specjalnie wykonane, prototypowe przyrządy tensometryczne (rys. 4 i 5), współpracujące z czujnikiem indukcyjnym VISTRONIK CE3. Przełożenie dźwigni w przyrządzie do pomiaru skróceń (rys. 4) jest równe 1:1. W przypadku poszerzenia  $\Delta a$  lub  $\Delta b$  operowano dwoma głowiczkami czujnika, odczytując na wskaźniku cyfrowym sumę ich przemieszczeń. Wykorzystywano zakres pomiarowy czujnika





Rys. 4. Pomiar skrócenia próbki



Rys. 5. Pomiar poszerzenia próbki

0 - 200  $\mu\text{m}$  charakteryzujący się rozdzielczością wskazań  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ .  
W celu wywarcia odpowiednich sił ściskających próbki posłużono się maszyną wytrzymałościową ZD 10/90, której klasa dokładności jest równa 1.

Wartości modułów Younga i współczynników Poissona określone są wzorami:

$$E_i = \frac{\Delta P_c}{ab \Delta c} \quad , \quad i = L, R, T, \quad (4)$$

$$\nu_{ij} = \frac{\Delta a}{\Delta c} \frac{c}{a} \quad \text{lub} \quad \nu_{ij} = \frac{\Delta b}{\Delta c} \frac{c}{b} \quad ; \quad i, j = L, R, T \quad i \neq j \quad (5)$$

przy czym odkształcenia  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  i  $\Delta c$  mierzone są na próbkach typu L, R i T. Wzór na moduł ścinania, wyprowadzony na podstawie zależności (3), przyjmuje postać:

$$G_{ij} = \frac{\Delta P_c}{2ab \Delta c \left(1 + \frac{\Delta a}{\Delta c} \frac{c}{a}\right)} \quad ; \quad i, j = L, R, T; \quad i \neq j; \quad G_{ij} = G_{ji} \quad (6)$$

przy czym odkształcenia  $\Delta a$  i  $\Delta c$  mierzone są na próbkach diagonalnych.

Przyrost  $\Delta P$  wartości obciążenia próbki jest równy różnicy górnej  $P_g$  i dolnej  $P_d$  wartości tego obciążenia:

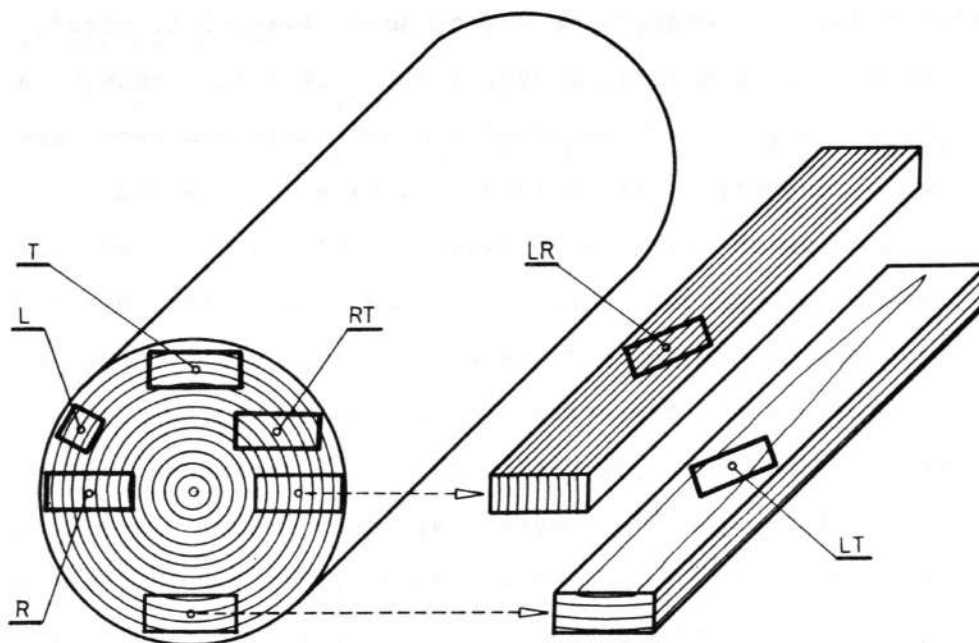
$$\Delta P = P_g - P_d \quad (7)$$

a odkształcenia  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  i  $\Delta c$  są w rzeczywistości przyrostami odkształceń odpowiadającymi temu przyrostowi obciążenia.

#### 4. Przygotowanie próbek do badań

Jak już zaznaczono we wstępie, badaniami objęto trzy gatunki drewna, mianowicie: drewno sosny pospolitej (*Pinus silvestris* L.), buka zwyczajnego (*Fagus silvatica* L.) i dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Surowiec wyjściowy w postaci pojedynczych kłód pochodził z drzew rosnących w Borach Tucholskich. Kłody te przetarto na bale o grubości 65 mm, które suszono w sposób naturalny pod wiatą przez okres jednego roku. Nas-

stępnie wycięto z nich półfabrykaty o szerokości 150 i 60 mm (na próbki typu  $L$ ) według zasady przedstawionej na rys. 6.



Rys. 6. Sposób pobierania z kłody próbek typu:  $L$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $LR$ ,  $LT$  i  $RT$

Po ośmiotygodniowym sezonowaniu tych półfabrykatów w pomieszczeniu laboratoryjnym przestругano je na grubość  $50 \pm 0,5$  mm, zaś w przypadku elementów przeznaczonych na wykonanie próbki typu  $L$  - na wymiar  $(50 \pm 0,5) \times (50 \pm 0,5)$  mm. Wreszcie z tak obrobionych półfabrykatów wycinano - zgodnie z rys. 2 i 6 - próbki o wymiarach  $(50 \pm 0,5) \times (50 \pm 0,5) \times (150 \pm 1)$  mm. Po selekcji wykluczającej próbki z wadami drewna dobrano po 20 próbek każdego typu do badań zasadniczych i po 3 - do badań wstępnych. Jedynie w przypadku próbek sosnowych typu  $LT$  oraz dębowych typu  $T$  i  $LT$  liczby próbek przeznaczonych do badań zasadniczych były nieco mniejsze.

Próbki sosnowe typu L, T i LT obejmowały tylko biel, natomiast próbki typu R, RT i LR oprócz bielu zawierały także, z konieczności - ze względu na swą długość, twarde. Strefa twardełowa nie przekraczała przy tym 1/3 długości próbki, także znajdująca się w środkowej części próbki baza pomiarowa odkształceń o długości 50 mm usytuowana była w obrębie bielu.

W próbkach dębowych występowało tylko drewno twarde, bowiem podczas obróbki bali odrzucano, mało wytrzymałą i nietrwałą w przypadku drewna dębowego, strefę bielu. Jeżeli chodzi o próbki bukowe, to nie zawierały one tzw. fałszywej twardełki.

Drewno próbek bukowych cechowała szerokosłistość, natomiast próbek sosnowych i dębowych - wąskosłistość. Przeciętne szerokości przyrostów rocznych dla próbek typu L, R i RT podano w tab. 1. W przypadku próbek typu R i RT pomiaru słistości dokonywano na środkowym odcinku próbki o długości 50 mm.

Tabela 1. Słistość drewna w próbkach niektórych typów

Typ próbki	Gatunek drewna		
	sosna	buk	dąb
	przeciętne szerokości przyrostów rocznych mm		
L	2,0	3,3	1,7
R	2,3	3,5	2,0
RT	2,5	3,8	2,0

Po dalszym czterotygodniowym sezonowaniu próbek w pomieszczeniu laboratoryjnym sprawdzono ich wilgotność do poziomu  $12 \pm 0,5$  %. Średnia wilgotność względna powietrza w laboratorium w okresie przechowywania w nim półfabrykatów a następnie próbek wynosiła 65 %, średnia temperatura 293 K (20°C).

Określono gęstość drewna, jej średnie wartości wynosiły:

480 kg/m<sup>3</sup> dla drewna sosny, 640 kg/m<sup>3</sup> dla drewna buka i 700 kg/m<sup>3</sup> dla drewna dębu.

Bezpośrednio przed badaniami szlifowano powierzchnie próbek, dążąc do uzyskania możliwie największej płaskości i równoległości górnej i dolnej powierzchni próbki, a zarazem prostopadłości tych powierzchni do ścianek bocznych.

##### 5. Przebieg badań i ich wyniki

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych, polegających na pomiarze odpowiednich odkształceń próbek, przeprowadzono badania wstępne w celu określenia zakresu obciążeń poszczególnych typów próbek. Sprowadzały się one do statycznych prób ściskania, którym poddawano po trzy próbki każdego typu i każdego gatunku drewna. W wyniku tych prób sporządzano wykresy odkształcenie - obciążenie oraz określano wartość siły niszczącej próbkę (za wyjątkiem sił niszczących próbki typu L). Ustalając górną wartość  $P_g$  siły ściskającej próbkę danego typu brano pod uwagę następujące kryteria:

- a) naprężenia ściskające wywołane przez tę siłę nie przekraczają granicy proporcjonalności dla kierunku drewna określonego typem próbki,
- b) stopień wyczerpania materiału wyrażony stosunkiem powyższych naprężeń i wytrzymałości na ściskanie drewna w danym kierunku jest zawarty w przedziale 0,1 - 0,2 ,
- c) średnie skrócenia bazy pomiarowej  $c$  wywołane siłą  $P_g$  są rzędu 50  $\mu\text{m}$ , niezależnie od typu próbki i gatunku drewna.

Tabela 2. Wartości obciążeń i prędkości obciążania próbek

Typ próbki	Gatunek drewna	Dolna wartość ( $P_d$ ) siły ściskającej	Górna wartość ( $P_g$ ) siły ściskającej	Prędkość obciążania próbki
		kN	kN	kN/min
L	sosna	10	30	20
	buk	10	30	20
	dąb	10	30	20
R,T	sosna	0,5	1,5	10
	buk	1	3	20
	dąb	1	3	20
LR,LT	sosna	2	6	20
	buk	2	6	20
	dąb	2	6	20
RT	sosna	0,5	1,5	10
	buk	1	3	20
	dąb	1	3	20

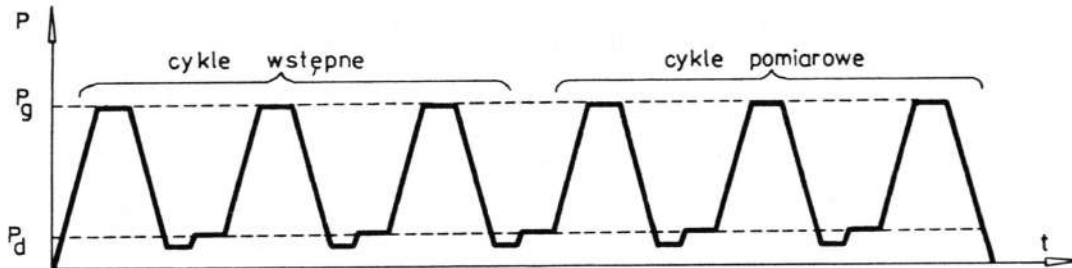
Dolną wartość  $P_d$  siły ściskającej próbkę określano według zasady:

$$P_d = \frac{1}{3} P_g \quad (8)$$

Tak ustalone wartości obciążeń dla poszczególnych typów próbek i gatunków drewna podano w tab. 2. W przypadku próbek typu L wartości te pokrywają się z zalecanymi przez polską normę PN-58/D-04115 (30).

Na podstawie badań wstępnych dobrano też prędkość obciążania próbek. Zamierzano przyjąć jednakową wartość tej prędkości równą 20 kN/min dla wszystkich przypadków próbek, jednak dla próbek sosnowych typu R, T i RT - ze względu na zbyt krótki czas narastania obciążenia od poziomu  $P_d$  do  $P_g$  - zmniejszono ją do 10 kN/min (tab. 2).

Pierwszym etapem badań zasadniczych był pomiar przyrostu  $\Delta c$  skrócenia próbki. Po zamocowaniu na próbce przyrządu tensometrycznego, z wykorzystaniem szablonu dystansowego zapewniającego zachowanie stałego odcinka pomiarowego  $c = 50 \pm 0,1$  mm, ustawiano ją w osi maszyny wytrzymałościowej dzięki specjalnej płytce centrującej nakładanej na dolną belkę rewersora maszyny. Następnie wywierano na próbkę nacisk poprzez przegub kulisty, stosując cykliczne obciążanie od dolnej  $P_d$  do górnej  $P_g$  granicy obciążenia zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7.



Rys. 7. Przebieg obciążania próbek

Odczyty odkształceń dokonywane były po upływie 30 s od chwili ustalenia sił  $P_d$  lub  $P_g$ , odciążanie odbywało się z tą samą prędkością co obciążanie. Jako wynik pomiaru przyjmowano średnią arytmetyczną odkształceń z trzech ostatnich cykli obciążania próbki.

W drugim etapie próbkę mocowano w przyrządzie (rys. 5) zapewniającym ustawienie jej w osi maszyny i pomiar poszerzenia  $\Delta a$  w połowie jej wysokości. Obciążano ją tak samo jak w pierwszym etapie pomiarów, przyjmując jako wynik pomiaru wartość średnią z trzech ostatnich cykli obciążeniowych. Dla próbek typu L, R i T dokonywano ponadto pomiaru poszerzeń  $\Delta b$ , stosując ponownie, a w sumie po raz trzeci, ten sam cykl obciążeń prób-

Tabela 3. Wyniki badania stałych sprężystości drewna sosnowego

Stałe sprężystości	Liczba próbek	Wartość			Odchylenie standardowe	Odchylenie standardowe wartości średniej	Współczynnik	
		najmniejsza	średnia	największa			zmienności %	pewności %
moduły Younga [MPa]	$E_L$	10300	11700	13800	1030	230	8,8	2,0
	$E_R$	800	940	1140	105	23	11,1	2,5
	$E_T$	330	410	460	48	11	11,8	2,6
moduły ścinania [MPa]	$G_{LR}$	810	950	1200	125	28	13,2	3,0
	$G_{LT}$	690	780	910	70	20	9,0	2,3
	$G_{RT}$	88	105	117	15	3	14,6	3,3
współczynniki Poissona	$\nu_{LR}$	0,36	0,43	0,50	0,06	0,01	13,9	3,1
	$\nu_{LT}$	0,38	0,46	0,55	0,05	0,01	11,5	2,6
	$\nu_{RT}$	0,56	0,65	0,78	0,10	0,02	15,4	3,4
	$\nu_{TR}$	0,22	0,32	0,50	0,06	0,01	19,3	4,3
	$\nu_{RL}$	0,023	0,041	0,072	0,012	0,003	29,3	6,6
	$\nu_{TL}$	0,008	0,018	0,028	0,006	0,001	32,8	8,3
gęstość drewna: $480 \text{ kg/m}^3$ , wilgotność drewna: 12 %								



Tabela 4. Wyniki badania stałych sprężystości drewna bukowego

Stałe sprężystości	Liczba próbek	Wartość			Odchylenie standardowe	Odchylenie standardowe wartości średniej	Współczynnik	
		najmniejsza	średnia	największa			zmienności %	pełności %
moduły Younga [MPa]	$E_L$	12300	14700	16300	270	1190	8,1	1,8
	$E_R$	1440	1640	1860	36	160	9,7	2,2
	$E_T$	850	950	1180	23	105	11,0	2,5
moduły ścinania [MPa]	$G_{LR}$	940	1100	1220	27	120	12,9	2,4
	$G_{LT}$	830	950	1100	28	125	13,2	3,0
	$G_{RT}$	300	330	360	8	35	10,6	2,4
współczynniki Poissona	$\nu_{LR}$	0,28	0,41	0,49	0,01	0,06	14,4	3,2
	$\nu_{LT}$	0,43	0,52	0,59	0,01	0,04	8,1	1,8
	$\nu_{RT}$	0,56	0,71	0,84	0,02	0,08	11,7	2,6
	$\nu_{TR}$	0,32	0,37	0,45	0,01	0,05	12,7	2,8
	$\nu_{RL}$	0,030	0,051	0,068	0,002	0,011	21,7	4,9
	$\nu_{TL}$	0,019	0,041	0,053	0,002	0,011	21,6	4,8
gęstość drewna: $640 \text{ kg/m}^3$ , wilgotność drewna : 12 %								

Tabela 5. Wyniki badania stałych sprężystości drewna dębowego

Stałe sprężystości	Liczba próbek	Wartość			Odchylenie standardowe	Odchylenie standardowe	Współczynnik	
		najmniejsza	średnia	największa			zmienności %	pewności %
moduły Younga [MPa]	$E_L$	11700	13800	15600	260	1180	8,6	1,9
	$E_R$	1600	1990	2350	60	250	12,6	2,8
	$E_T$	810	200	1070	25	100	11,1	2,8
moduły ścinania [MPa]	$G_{LR}$	1100	1260	1560	40	160	12,7	2,8
	$G_{LT}$	690	860	1040	25	105	12,2	2,9
	$G_{RT}$	340	400	530	17	52	13,0	2,9
współczynniki Poissona	$\nu_{LR}$	0,28	0,39	0,50	0,01	0,06	15,0	3,4
	$\nu_{LT}$	0,40	0,49	0,59	0,01	0,05	10,5	2,3
	$\nu_{RT}$	0,53	0,69	0,80	0,02	0,08	11,0	2,5
	$\nu_{TR}$	0,28	0,36	0,48	0,02	0,06	16,3	4,1
	$\nu_{RL}$	0,043	0,069	0,104	0,005	0,020	28,9	6,5
	$\nu_{TL}$	0,027	0,039	0,055	0,002	0,009	23,1	5,8
gęstość drewna: , wilgotność drewna : 12 %								

Przed pomiarami odkształceń mierzono, w połowie wysokości próbki, jej wymiary  $a$  i  $b$  za pomocą suwmiarki, z dokładnością 0,1 mm.

Względna wilgotność powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym podczas badań wynosiła  $65 \pm 5 \%$ , zaś jego temperatura  $293 \pm 2$  K ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Na podstawie pomiarów na próbkach typu L, R i T obliczano, za pomocą wzorów (4) i (5), wartości modułów Younga i współczynników Poissona, natomiast na podstawie pomiarów na próbkach diagonalnych LR, LT i RT - wartości modułów ścinania, stosując wzór (6). Wyznaczone wartości stałych sprężystości opracowano statystycznie, zestawiając w tabelach 3, 4 i 5 wartości średnie tych stałych oraz pozostałe parametry statystyczne dla badanych gatunków drewna.

## 6. Ocena błędów pomiarowych

Błąd względny wyznaczania modułu Younga, obliczony na podstawie wzoru (4) przy założeniu, że długość bazy pomiarowej jest stałą przyrządu tensometrycznego, jest równy:

$$\left| \frac{\Delta E_i}{E_i} \right| = \left| \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} \right| + \left| \frac{(\Delta a)^*}{a} \right| + \left| \frac{(\Delta b)^*}{b} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta c)}{\Delta c} \right| \quad (9)$$

Błąd względny pomiaru przyrostu  $\Delta P$  obciążenia próbki, w związku z zależnością (7) i klasą dokładności maszyny wytrzymałościowej, wynosi:

$$\left| \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} \right| = \frac{0,01 \cdot (P_1 + P_2)}{P_1 \cdot P_2} \quad (10)$$

błędy  $(\Delta a)^*$  i  $(\Delta b)^*$  pomiaru wymiarów  $a$  i  $b$  próbki wynoszą 0,1 mm, błąd  $\Delta(\Delta c)$  pomiaru przyrostu skrócenia próbki wynikający z charakterystyki (atestu) stosowanej głowiczki pomiarowej czujnika indukcyjnego jest równy  $0,1 + 0,1 = 0,2$   $\mu\text{m}$ .

Określając błąd wyznaczania współczynnika Poissona należy uwzględnić fakt, że pomiar skróceń  $\Delta c$  i poszerzeń  $\Delta a$  (lub  $\Delta b$ ) nie odbywa się jednocześnie, lecz podczas dwóch kolejnych prób, w których wprowadzie stosuje się te same obciążenia nominalne  $P_0$  i  $P_0$ , popełnia się jednak każdorazowo błąd w ustaleniu ich wartości. Oznaczając przez  $\Delta P'$  rzeczywisty przyrost obciążenia przy pomiarze skrócenia  $\Delta c$  a przez  $\Delta P''$  - przy pomiarze poszerzenia  $\Delta a$  lub  $\Delta b$  i uwzględniając proporcjonalność odkształceń do obciążeń, wzory (5) możemy przedstawić w następującej, skorygowanej postaci:

$$\nu_{ij} = \frac{\Delta a}{\Delta c} \frac{c}{a} \frac{\Delta P'}{\Delta P''} \text{ lub } \nu_{ij} = \frac{\Delta b}{\Delta c} \frac{c}{b} \frac{\Delta P'}{\Delta P''} \quad (11)$$

Błąd względny wyznaczenia współczynnika Poissona, określony na podstawie wzoru (11), jest równy:

$$\left| \frac{\Delta \nu_{ij}}{\nu_{ij}} \right| = \left| \frac{\Delta(\Delta a)}{\Delta a} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta c)}{\Delta c} \right| + \left| \frac{(\Delta a)^*}{a} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P')}{\Delta P'} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P'')}{\Delta P''} \right| \quad (12)$$

lub

$$\left| \frac{\Delta \nu_{ij}}{\nu_{ij}} \right| = \left| \frac{\Delta(\Delta b)}{\Delta b} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta c)}{\Delta c} \right| + \left| \frac{(\Delta b)^*}{b} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P')}{\Delta P'} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P'')}{\Delta P''} \right|$$

przy czym

$$\left| \frac{\Delta(\Delta P')}{\Delta P'} \right| = \left| \frac{\Delta(\Delta P'')}{\Delta P''} \right| = \left| \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} \right| = \left| \frac{0,01 (P_0 + P_0)}{P_0 - P_0} \right| \quad (13)$$

zaś błędy pomiaru przyrostów poszerzeń  $\Delta(\Delta a)$  i  $\Delta(\Delta b)$  są, podobnie jak błąd  $\Delta(\Delta c)$ , równe  $0,2 \mu\text{m}$ .

Również w przypadku oznaczania modułów ścinania pomiar odkształceń  $\Delta c$  i  $\Delta a$  odbywa się w dwóch etapach. Wzór (6), po uwzględnieniu rzeczywistych przyrostów obciążenia  $\Delta P'$  i  $\Delta P''$  odpowiadającym tym etapom, przyjmuje postać:

$$G_{ij} = \frac{\Delta P' c}{2 a b \Delta c \left( 1 - \frac{\Delta a}{\Delta c} \frac{c}{a} \frac{\Delta P'}{\Delta P''} \right)}, \quad (14)$$

Tabela 6. Błędy względne wyznaczania stałych sprężystości

Stałe sprężystości	Zakres błędu względnego %
moduły Younga	2,6 - 3,6
moduły ścinania	3,0 - 4,3
Współczynniki Poissona: $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ i $\nu_{TR}$	4,9 - 7,2
współczynniki Poissona: $\nu_{RL}$ i $\nu_{TL}$	14,5 - 32,8

Tabela 7. Przykładowe kształtowanie się błędu wyznaczenia współczynnika Poissona  $\nu_{RL}$  - próbka bukowa typu R,  $\Delta a = 1,1 \mu\text{m}$ ,

$\Delta c = 24,2 \mu\text{m}$ ,  $a = 49,8 \text{ mm}$ ,  $P_d = 1 \text{ kN}$ ,  $P_g = 3 \text{ kN}$

$\frac{\Delta(\Delta a)}{\Delta a} \times 100$	$\frac{\Delta(\Delta c)}{\Delta c} \times 100$	$\frac{(\Delta a)^*}{a} \times 100$	$\frac{\Delta(\Delta P')}{\Delta P'} \times 100$	$\frac{\Delta(\Delta P'')}{\Delta P''} \times 100$	$\frac{\Delta \nu_{RL}}{\nu_{RL}} \times 100$
%	%	%	%	%	%
18,2	0,8	0,2	2,0	2,0	23,2

natomiast błąd względny wyznaczenia modułu ścinania wyraża się

wzorem:

$$\left| \frac{\Delta G_{ij}}{G_{ij}} \right| = \frac{1}{1 + \frac{\Delta a}{\Delta c} \frac{c}{a}} \left( \left| \frac{\Delta(\Delta c)}{\Delta c} \right| + \left| \frac{(\Delta a)^*}{a} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P')}{\Delta P'} \right| \right) + \frac{1}{1 + \frac{\Delta c}{\Delta a} \frac{a}{c}} \left( \left| \frac{\Delta(\Delta a)}{\Delta a} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta P'')}{\Delta P''} \right| \right) + \left| \frac{(\Delta b)^*}{b} \right| \quad (15)$$

przy czym i w tym przypadku obowiązuje zależność (13).

Wartości błędów względnych dla poszczególnych stałych sprężystości, obliczone za pomocą (9), (10), (12), (13) i (15) przedstawiono w tab. 6. Najmniejsze wartości błędu, rzędu 3 %, wystę-

dużą w przypadku modułów Younga, nieco większe - w przypadku modułów ścinania. Największym błędem, dochodzącym do 33 %, obciążone jest wyznaczanie współczynników Poissona  $\nu_{RL}$  i  $\nu_{TL}$ . Tak duży błąd - jak wynika z tab. 7, w której przedstawiono składniki błędów wyznaczenia współczynnika  $\nu_{RL}$  dla jednej z próbek typu R - jest wnoszony przede wszystkim przez pomiar poszerzenia w kierunku wzdłużnym L. Zarówno bowiem w przypadku ściskania w kierunku promieniowym R, jak i stycznym T wydłużenia w kierunku wzdłużnym są bardzo małe, w przeprowadzonych badaniach nie przekraczały 2  $\mu\text{m}$ .

Należy zauważyć, że ewentualne zastosowanie innej techniki pomiaru odkształceń próbki, zapewniającej jednoczesny pomiar odkształceń  $\Delta c$  i  $\Delta c^c$  wpłynęłoby w niewielkim stopniu na wielkość błędów wyznaczenia współczynnika Poissona - błąd ten uległby zmniejszeniu o 2 %.

Istotną rzeczą, szczególnie przy oznaczaniu współczynników Poissona, jest duża dokładność pomiaru odkształceń  $\Delta c$  i  $\Delta c^c$ . Zastosowano czujnik indukcyjny, dla którego niedokładność wskazań w wykorzystywanym zakresie nie przekracza  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Zastąpienie go na przykład czujnikiem zegarowym o działce elementarnej 1  $\mu\text{m}$  pociągałoby za sobą znaczne, kilkakrotnie większe błędy wyznaczania stałych sprężystości i w efekcie uzyskane wyniki, szczególnie wartości współczynników Poissona, nie mogłyby być uznane za wiarygodne.

## 7. Analiza wyników

Jak wynika z tabel 3, 4 i 5 najmniejszym rozrzutem wyników cechują się moduły Younga, szczególnie moduł  $E_L$ , ich współczynniki zmienności są bliskie 10 %. Nieco większe rozrzuty dla

modułów ścinania wynikają z faktu, że podstawą oznaczania tych stałych sprężystości jest pomiar dwóch odkształceń, a nie jednego - jak to ma miejsce przy wyznaczaniu modułów Younga. W przypadku współczynników Poissona szczególnie duże rozrzuty wyników dotyczą stałych  $\nu_{RL}$  i  $\nu_{TL}$ , ich współczynniki zmienności przekraczają 20 %. Ma to związek z dużym błędem wyznaczania tych dwóch stałych. Ogólnie, nie licząc stałych  $\nu_{RL}$  i  $\nu_{TL}$ , współczynniki zmienności badanych stałych sprężystości drewna można uznać za niewielkie jak dla właściwości mechanicznych drewna. Z pewnością odegrała tu rolę staranność wykonania i selekcji próbek, lecz przede wszystkim przyczyną niedużych rozrzutów wyników jest to, że wszystkie próbki dla danego gatunku drewna pochodziły z jednej próbki pierwotnej - jednej kłody.

W badaniach wyznaczano komplety dwunastu niezależnych stałych sprężystości drewna. Pojawia się pytanie, czy wartości średnie tych stałych spełniają związek (2) wynikające z przyjęcia ortotropowego modelu właściwości sprężystych drewna. W celu odpowiedzi na nie posłużymy się ilorazami kontrolnymi  $J_{ij}$ :

$$J_{ij} = \frac{\nu_{ij}}{E_i} : \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad , \quad (16)$$

których wartości dla idealnego ciała ortotropowego powinny być równe 1. Rzeczywiste wartości tych ilorazów dla poszczególnych gatunków drewna podano w tab. 8. Różnią się one dość znacznie od 1, mieszcząc się w przedziale 0,82 - 1,11. Drewno nie jest bowiem idealnym ciałem ortotropowym; szczególnie - ze względu na krzywiznę słoii rocznych - brak jest pełnej symetrii sprężystej względem płaszczyzny stycznej  $\perp$ . Ponadto istotną rolę odgrywa tutaj duża niepewność co do wartości współczynników Poissona  $\nu_{RI}$  i  $\nu_{TL}$ , a po części także i  $\nu_{TR}$ , wynikająca z dużych

Tabela 8. Wartości ilorazów kontrolnych  $I_{ij}$  dla badanych gatunków drewna

Iloraz kontrolny	Gatunek drewna		
	sosna	buk	dąb
$J_{LR} = \frac{\sqrt{I_{LR}}}{E_L} : \frac{\sqrt{I_{RL}}}{E_R}$	0,84	0,90	0,82
$J_{LT} = \frac{\sqrt{I_{LT}}}{E_L} : \frac{\sqrt{I_{TL}}}{E_T}$	0,90	0,82	0,82
$J_{RT} = \frac{\sqrt{I_{RT}}}{E_R} : \frac{\sqrt{I_{TR}}}{E_T}$	0,89	1,11	0,87



błędów wyznaczania tych stałych i znacznych rozrzutów ich wyników. Biorąc to pod uwagę postanowiono, zgodnie z propozycjami Hearmona (11) oraz Bodiga i Goodmana (5), za bardziej wiarygodne uznać wartości tych współczynników obliczone za pomocą związków (2), a więc na podstawie "pewniejszych" stałych sprężystości  $E_i$ ,  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{LT}$  i  $\nu_{RT}$ . Wzory na skorygowane wartości tych współczynników mają postać:

$$\check{\nu}_{RL} = \nu_{LR} \frac{E_R}{E_L}, \quad \check{\nu}_{TL} = \nu_{LT} \frac{E_T}{E_L}, \quad \check{\nu}_{TR} = \nu_{RT} \frac{E_T}{E_R} \quad (17)$$

Wartości te uwzględniono w tabelach 9 i 11.

Uzyskane wyniki - wartości średnie stałych sprężystości badanych gatunków drewna porównano z wynikami badań zagranicznych. Ze względu na to, że badania te prowadzono przy różnych wilgotnościach drewna (od 9,7 do 15,0 %) wartości  $X_w$  stałych sprężystości przy wilgotności  $w$  % sprowadzono do wartości  $X_{12}$  odpowiadających wilgotności drewna równej 12 %, czyli takiej, jaka występowała w badaniach własnych. Stosowano zalecany przez normy GOST (26-29) wzór przeliczeniowy:

$$X_{12} = \frac{X_w}{1 - \alpha (w - 12)}, \quad (18)$$

dotyczący wszystkich stałych sprężystości drewna. Występujący w nim współczynnik poprawkowy  $\alpha$  zależy od rodzaju stałej sprężystości i wynosi: 0,012 dla modułu  $E_L$ ; 0,033 - dla  $E_R$ ; 0,039 - dla  $E_T$ ; 0,020 - dla współczynników Poissona i 0,030 - dla modułów ścinania.

Porównywane wyniki badań własnych i zagranicznych zestawiono w tab. 9. Wyniki zaczerpnięte ze źródeł (12, 21, 22) dotyczą badań niemieckich, ze źródła (18) - radzieckich, ze źródła (5) - amerykańskich (USA). Widoczne są znaczne różnice wartości stałych sprężystości danego gatunku drewna uzyskanych w różnych badaniach.

Tabela 9. Zestawienie wartości stałych sprężystości drewna uzyskanych w badaniach własnych (b.wł.) i zaczerpniętych z literatury (po sprowadzeniu tych ostatnich do poziomu wilgotności  $W = 12\%$ )

Gatunek drewna	Źródło	Gęstość drewna $g/cm^3$	Moduły Younga			Moduły ścinania			Współczynniki Poissona					
			$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$	$\nu_{TR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{TL}$
			MPa			MPa			-					
sosna	b.wł.	0,48	11700	940	410	950	780	105	0,43	0,46	0,65	0,28*	0,035*	0,016*
	[12,21,22]	0,54	16200	1040	530	1670	640	65	0,45	0,43	0,58	0,30	0,031	0,016
	[18]	0,49	12100	570	480	1250	780	-	0,52	0,44	0,54	0,40	0,030	0,037
buk	b.wł.	0,64	14700	1640	950	1100	950	330	0,41	0,52	0,71	0,41*	0,046*	0,034*
	[12,21,22]	0,74	13800	2170	1100	1570	1030	450	0,44	0,51	0,69	0,35	0,073	0,043
	b.wł.	0,70	13800	1990	900	1260	860	400	0,39	0,49	0,59	0,31*	0,056*	0,032*
dąb	[12,21,22]	0,67	5800 <sup>x</sup>	2160	970	1300	770	400	0,32	0,50	0,65	0,29	0,120	0,086
	[18]	0,71	14500	1220	940	1450	1000	480	0,46	0,44	0,88	0,36	0,070	0,090
	[5]	0,60	15100	1530	840	980	710	400	0,22	0,46	0,51	0,31	0,035	0,051

\* - wartości skorygowane, obliczone za pomocą wzorów (17)

x - wartość nadzwyczaj niska, kwestionowana w pracy [14]

zagranicznych. Pomijając przypadek nadmiernie małej wartości modułu  $E_L$  dla drewna dębu według badań niemieckich, różnice te dochodzą na przykład do 82 % przy porównywaniu wartości modułu  $E_R$  dla drewna sosny według badań niemieckich i radzieckich, czy też - do 105 % przy porównywaniu współczynnika Poissona  $\nu_{RT}$  dla tegoż drewna według badań radzieckich i amerykańskich.

Wyniki badań własnych nie "przystają", biorąc pod uwagę komplet dwunastu stałych sprężystości, do wyników tych czy innych badań zagranicznych. O ile niektóre ze stałych sprężystości, jak na przykład  $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}$  i  $\nu_{RL}$  dla drewna sosny według badań własnych i radzieckich, mają wartości zbliżone do uzyskanych w danych badaniach zagranicznych, o tyle dla pozostałych stałych występują znaczne różnice ich wartości.

Nie wnikając głębiej w przyczyny stwierdzonego zróżnicowania wartości stałych sprężystości drewna danego gatunku, wskazać można na trzy z nich: różna gęstość drewna; różne pochodzenie drewna - z siedlisk znajdujących się w różnych krajach, na różnych kontynentach; różne metodyki badań. Bodig i Goodman (5) uznali gęstość drewna za podstawowy czynnik decydujący o jego właściwościach sprężystych. Uwzględniając wyniki wielu badań zaproponowali następujący wzór empiryczny umożliwiający obliczenie modułów Younga i modułów ścinania w zależności od gęstości drewna:

$$X = A \varrho^B \quad (19)$$

gdzie:  $\varrho$  - gęstość drewna w  $g/cm^3$ ,  $A$  i  $B$  - stałe empiryczne. Stałe te nie zależą przy tym od gatunku drewna jak również od miejsca jego pochodzenia, lecz jedynie od tego, czy jest to drewno drzew iglastych czy też liściastych. Ich wartości przytoczono w tab. 10.

Tabela 10. Porównanie wartości modułów Younga i modułów ścinania drewna uzyskanych w badaniach własnych i obliczonych na podstawie zależności empirycznych

Gatunek drewna	Stała sprężystości	Wartości modułów w MPa				$\frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100$ %	Wartość modułu w MPa obliczone wg [25]		$\frac{X_1 - X_3}{X_3} \times 100$ %
		uzyskane w badaniach własnych $X_1$	obliczone wg [5]		$X_2$		$\beta$	$X_3 = \beta E_L$	
			A	B		$X_2 = A S^B$			
sosna	$E_L$	11700	51630	1,73	14500	-19,3	-	-	-
	$E_R$	940	2210	0,99	1070	-12,1	0,10	1170	-19,7
	$E_T$	410	2012	1,43	700	-41,4	0,05	585	-29,9
	$G_{LR}$	950	1536	0,79	860	10,5	0,075	878	8,2
	$G_{LT}$	780	1296	0,67	790	-1,3	0,06	702	11,1
	$G_{RT}$	105	289	1,51	95	10,5	0,018	211	-50,2
buk	$E_L$	14700	24000	1,07	14900	-1,3	-	-	-
	$E_R$	1640	2603	1,19	1530	7,2	0,10	1470	11,6
	$E_T$	950	1689	1,59	830	14,5	0,05	735	29,3
	$G_{LR}$	1100	1983	1,16	1180	-6,8	0,075	1103	-0,3
	$G_{LT}$	950	1560	1,26	890	6,7	0,06	882	7,7
	$G_{RT}$	330	571	1,41	300	10,0	0,018	265	24,5
dąb	$E_L$	13800	24000	1,07	16400	-15,9	-	-	-
	$E_R$	1990	2603	1,19	1700	17,1	0,10	1380	44,2
	$E_T$	900	1689	1,59	960	-6,3	0,05	690	30,4
	$G_{LR}$	1260	1983	1,16	1310	-3,8	0,075	1035	21,7
	$G_{LT}$	860	1560	1,26	990	-13,1	0,06	828	3,9
	$G_{RT}$	400	571	1,41	350	14,3	0,018	248	61,3

Dla współczynników Poissona Bodiga i Goodmana poszli jeszcze dalej, proponując pewne uśrednione wartości, niezależne od gatunku drewna i jego gęstości. Wartości te, odmienne dla drewna drzew iglastych i liściastych, podano w tab. 11.

Sugerując się propozycjami Bodiga i Goodmana (5) porównano wyniki badań własnych z wartościami modułów Younga i modułów ścinania obliczonymi za pomocą wzoru (19) na podstawie gęstości

Tabela 11. Porównanie wartości współczynników Poissona uzyskanych w badaniach własnych ( $x_1$ ) i proponowanych przez Bodiga i Goodmana ( $x_2$ )

Stała sprężystości	sosna			buk			dąb		
	$X_1$	$X_2$	$\frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100$ %	$X_1$	$X_2$	$\frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100$ %	$X_1$	$X_2$	$\frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100$ %
$\nu_{LR}$	0,43	0,37	16,2	0,41	0,37	10,8	0,39	0,37	5,4
$\nu_{LT}$	0,46	0,42	9,5	0,52	0,50	4,0	0,49	0,50	-2,0
$\nu_{RT}$	0,65	0,47	38,3	0,71	0,67	6,0	0,69	0,67	3,0
$\nu_{TR}$	0,28	0,35	-20,0	0,41	0,33	24,2	0,31	0,33	-6,1
$\nu_{RL}$	0,035	0,041	-14,6	0,046	0,044	4,5	0,056	0,044	27,3
$\nu_{TL}$	0,016	0,033	-51,5	0,034	0,027	25,9	0,032	0,027	18,5

drewna (tab. 10) i z wartościami współczynników Poissona proponowanymi przez tych badaczy (tab. 11). Porównanie to nie wypada zadowalająco. Tylko w niektórych przypadkach różnice względne wartości stałych sprężystości są rzędu kilku procent, częściej osiągają poziom kilkunastu a nawet kilkudziesięciu procent.

Jedną z możliwości empirycznego określenia modułów Younga i modułów ścinania jest wyznaczenie ich na podstawie modułu  $E_L$ , który stosunkowo łatwo można oznaczyć metodą zginania beleczek o osi równoległej do włókien drewna. W opracowaniu (25) jego autorzy proponują obliczanie tych stałych sprężystości za pomocą prostego wzoru:

$$X = \beta E_L \quad (20)$$

w którym współczynnik  $\beta$  zależy tylko od rodzaju stałej sprężystości (tzn. modułu Younga  $E_R$  lub  $E_T$  i modułu ścinania). Jego wartości podano w tab. 10. Po obliczeniu za pomocą tego wzoru wartości modułów sprężystości dla badanych gatunków drewna na podstawie ich modułu  $E_L$  wyznaczonego eksperymentalnie w bada-

niach własnych, porównano je z wartościami modułów uzyskanymi w tych badaniach (tab. 10). Wyniki tego porównania są jeszcze gorsze niż poprzednio, różnice względne wartości porównywanych modułów z reguły przekraczają 20 %.

Niezgodność wartości stałych sprężystości badanego drewna pochodzenia krajowego z wartościami tych stałych dla drewna pochodzącego z innych krajów, a także z wartościami określonymi na podstawie takich parametrów jak gęstość drewna czy też moduł Younga w kierunku wzdłużnym, jak również fakt, że dla drewna danego gatunku materiał badawczy pochodził z jednej próbki pierwotnej - wskazują na potrzebę poszerzonych badań krajowych gatunków drewna pochodzącego z różnych siedlisk, z różnych regionów Polski. Badania takie będą niewątpliwie bardzo pracochłonne, tym bardziej, że powinno się w nich uwzględnić wpływ typowych wad drewna. Jednak ze względu na potrzeby nowoczesnych technik obliczeniowych wdrażanych do projektowania konstrukcji drewnianych należałoby je realizować, choćby w odniesieniu do podstawowych gatunków drewna konstrukcyjnego.

## 8. Podsumowanie

Celem badań przedstawionych w pracy było określenie właściwości sprężystych dla wybranych typowych gatunków drewna pochodzenia krajowego stosowanych w konstrukcjach drewnianych. Przy założeniu, że drewno jest materiałem ortotropowym wyznaczono wartości odpowiednich stałych sprężystości - trzech modułów Younga, trzech modułów ścinania i sześciu współczynników Poissona. Zastosowano metodę statyczną polegającą na ścisaniu prostopadłościennych próbek, do pomiaru odkształceń tych próbek wykorzystano przyrządy tensometryczne współpracujące z czujnikiem indukcyjnym.

Surowiec na próbki badanych gatunków drewna - sosnowego, bukowego i dębowego - pobrano każdorazowo z jednej kłody. Badania prowadzono przy stałych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych, którym odpowiadała wilgotność równoważna drewna równa 12 %.

Wyniki badań charakteryzują się stosunkowo niedużymi rozrzutami i jak wykazała przeprowadzona analiza błędów - niewielkimi niepewnościami pomiarowymi. Jedynie współczynniki Poissona odbiegają od tej prawidłowości, dlatego też skorygowano je wykorzystując zależności opisujące ciało ortotropowe. Można przyjąć, że uzyskane wyniki potwierdzają poprawność zastosowanej metodyki badań, przy czym niezbędna jest duża dokładność pomiaru odkształceń.

Wyznaczone w badaniach wartości stałych sprężystości drewna porównano z wynikami badań zagranicznych, sprowadzając te wyniki do jednego, odpowiadającego badaniom własnym, poziomu wilgotności drewna. Stwierdzono duże różnice między większością porównywanych stałych sprężystości. Jedną z przyczyn tych niezgodności jest różna gęstość drewna stosowanego w poszczególnych badaniach. Biorąc to pod uwagę wykorzystano podane w literaturze wzory określające wartości stałych sprężystości drewna jako odpowiednie funkcje jego gęstości i obliczono wartości tych stałych dla badanych gatunków drewna na podstawie gęstości tego drewna. Tak wyznaczone wartości skonfrontowano z wynikami badań własnych. Porównanie to nie wypadło jednak zadowalająco. Jeszcze gorzej wypadło kolejne porównanie - z wartościami modułów Younga i modułów ścinania obliczonymi według danych literaturowych na podstawie wartości modułu Younga w kierunku wzdłużnym.

Powyższe niezgodności nakazują ostrożność w korzystaniu z zagranicznych danych literaturowych jeśli chodzi o właściwości

sprężyste drewna pochodzenia krajowego. Należy także wziąć pod uwagę to, że wyniki badań własnych nie są reprezentatywne dla drewna krajowego, wszak przedmiotem badań było drewno pochodzące z jednej tylko próbki pierwotnej. Celowym, biorąc pod uwagę potrzebę dokładnego, optymalnego projektowania konstrukcji drewnianych, wydaje się przeprowadzenie poszerzonych badań właściwości sprężystych podstawowych gatunków drewna konstrukcyjnego pochodzącego z różnych regionów kraju.

#### Literatura

1. Albers K.: Gleitzahlmessungen an Holzwerkstoffen - Direktmessung an Schubwürfeln. Holz als Roh-und Werkstoff 1971 nr 5 s. 178 - 183
2. Albers K.: Gleitzahlmessungen and Holzwerkstoffen - Messungen an Diagonalproben zur indirekten Gleitzahlbestimmung. Holz als Roh-und Werkstoff 1971 nr 6 s. 219-223
3. Aškenazi E.K.: Anizotropija drevesiny i drevesnych materialov. Lesnaja Promyšlennost' Moskva 1978
4. Aškenazi E.K., Ganov E.V.: Anizotropija konstrukcionnych materialov. Mašinstroenie Leningrad 1980
5. Bodig J., Goodman J.R.: Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science 1973 vol. 5 No 4 s. 249-264
6. Bucur V., Archer R.R.: Elastic constants for wood by an ultrasonic method. Wood Science and Technology 1984 vol. 18 s. 255-265
7. Dzbeński W.: Nieniszczące badania mechanicznych właściwości iglastej tarcicy konstrukcyjnej metodami statycznymi i dynamicznymi. Rozprawy Naukowe i Monografie SGGW-AR, Warszawa 1984



8. Gonet B.: Moduł sprężystości w poprzek włókien drewna bukowego i dębowego. Przemysł Drzewny 1971 nr 8 s. 7-9
9. Görlacher R.: Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz als Roh-und Werkstoff 1984, nr 6 s. 219-222
10. Gunnerson R.A., Goodman J.R., Bodig J.: Plate tests for the determination of elastic parameters of wood. Wood Science 1972 vol. 4 No 5 s. 241-248
11. Hearmon R.F.S.: The elasticity of wood and plywood. Forest Prod. Res. Lab. Special Report No 7, London 1948
12. HÖrig H.: Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz. Ing. - Arch. 1935 Bd. 6 s. 8-14 (cyt. za (13) )
13. Keylwerth R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. VDI - Forschungsheft 430, Düsseldorf 1951
14. Kollmann F., Cote W. Jr: Principles of wood science and technology, vol. I. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1968
15. Korzeniowski A.: Badania nad modułem sprężystości warstwowego układu drewno - klej mocznikowy. Folia Forestalia Polonica, seria B, 1965 nr 6 s. 181 - 269
16. Labudin B.V.: Metodika opredelenija modulej sdviga drevesiny iz opytov na kručenie. I.V.U.Z. - Lesnoj Žurnal 1978 nr 1 s. 85-92
17. Lechnickij S.G.: Teorija uprugosti anizotropnogo tela. Nauka, Moskva 1977
18. Leontiev N.L.: Uprugije deformacii drevesiny. Goslesbumizdat, Moskva - Leningrad 1952
19. Požgaj A.: Šmykove moduly pružnosti dreva. Drevarsky Vyskum 1971 nr 4 s. 237-250

20. Požgaj A.: Opravne čísla modulov pružnosti v tlaku vzhladom na vlhkosť dreva. Drevarsky Vyskum 1974 nr 2 s. 83-92
21. Stamer J.: Elastizitätsuntersuchungen an Hölzern. Ing. - - Arch. 1935 Bd. 6 s. 1-8 (cyt. za (13) )
22. Stamer J., Sieglerschmidt H.: Elastische Formänderungen der Hölzer. Z. VDI 1933 Bd. 77 s. 503-505 (cyt. za (13) )
23. Tuluzakov V.V.: Opredelenie uprugich postojannyh drevesiny po sokraščennoj programme. Sbornik Rabot Mosk. Lesotech. Inst. 1970 nr 35 s. 178-186
24. Wilczyński A.: Model anizotropii właściwości sprężystych drewna. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 1987 z. 334 s. 115-132
25. Wood handbook. The Forest Products Laboratory, Madison 1974

#### Normy

26. GOST 16483.24 - 73: Drevesina. Metod opredelenija modulja uprugosti pri sžati vdol volokon.
27. GOST 16483.25 - 73: Drevesina. Metod opredelenija modulja uprugosti pri sžati poperek volokon.
28. GOST 16483.29 - 73: Drevesina. Metod opredelenija koeficientov poperečnoj deformacij.
29. GOST 16483.30 - 73: Drevesina. Metod opredelenija moduliej sdviga.
30. PN-58/D-04115: Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczenie współczynnika sprężystości przy ścisnaniu wzdłuż włókien.
31. PN-63/D-04117: Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczenie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym.

32. PN-59/D-04118: Fizyczne i mechaniczne własności drewna.  
Oznaczanie współczynnika sprężystości przy rozciąganiu  
wzdłuż włókien.

33. PN-75/D-04123: Drewno. Oznaczanie modułu sprężystości przy  
zginaniu statycznym w strefie czystego zginania.

Арнольд Вильчинский  
Марек Гоголин

Исследование упругих свойств древесины сосны, бука и дуба

#### Содержание

В статье описано исследования упругих свойств воздушно - сухой древесины пород типично выступающих в Польше. При основании, что древесина - это ортотропный материал, определено комплект 12 постоянных упругости: три модули упругости, три модули сдвига и шесть коэффициентов поперечной деформации. Использовано статический опыт сжатия и механические измерение деформаций образцов. Результаты обработано статистически, делая дополнительно оценку максимальных ошибок измерений. Проведено анализ полученных результатов и сравнено с зарубежными литературными данными.