

**POLITECHNIKA OPOLSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY



**ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Mariusz Łapka

**Wpływ efektu skali na mechanikę zniszczenia  
drewna konstrukcyjnego**

Promotor

dr hab. inż. Adam Niestony, Prof. PO

Opole 2013

*Składam serdeczne podziękowania Panu dr hab. inż. Januszowi Sztyberowi, Prof. PO oraz mojemu promotorowi Panu dr hab. inż. Adamowi Niesłonemu, Prof. PO za cenne uwagi i wskazówki, opiekę naukową oraz poświęcony czas i trud włożony w pomoc w trakcie realizacji niniejszej pracy.*

*Wyrazy podziękowania kieruję również do Pana mgr inż. Andrzeja Noskowiaka za życzliwość i pomoc w realizacji badań.*

*Serdecznie dziękuję wszystkim Koleżankom i Kolegom, którzy własną pomocą i życzliwością przyczynili się do powstania tej pracy.*

*Pragnę również gorąco podziękować mojej Rodzinie za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie.*

## Streszczenie

Drewno pod wieloma względami przewyższa inne materiały konstrukcyjne. Jednak własności drewna – istotnie wpływające na jakość wyrobów z drewna, takie jak mała wytrzymałość i sztywność w kierunkach prostopadłych do włókien, istotne zmiany własności mechanicznych przy wzroście wilgotności oraz wynikające z własności reologicznych pełzanie drewna (nawet w temperaturze pokojowej) wywołują w szeregu przypadków brak zaufania do drewna jako materiału konstrukcyjnego. Ten brak zaufania wynika w dużej mierze z niedostatecznego poznania własności mechanicznych drewna i wyrobów z drewna.

W szczególności ważnym lecz mało poznany zagadnieniem jest wpływ właściwości struktury drewna na jego właściwości mechaniczne. Z zagadnieniem tym jest ściśle związane poznanie istoty efektu skali w drewnie. Jest to konieczne przy rozwiązywaniu jednego z głównych zadań technicznej nauki o drewnie – określenia zależności mechanicznych charakterystyk drewna od wymiarów badanych próbek i rzeczywistych elementów konstrukcyjnych. Zaznaczyć przy tym należy, że badania wytrzymałości i sprężystości drewna – materiału anizotropowego lepko–sprężysto–plastycznego metodami zapożyczonymi z badań materiałów izotropowych w obszarze naprężeń i odkształceń sprężystych budzi szereg zastrzeżeń.

Przydatność wyników tych badań, które traktować należy jako podstawowe do obliczeń wytrzymałościowych, zależna jest od znajomości współczynników poprawkowych opisujących wpływ wzrostu wymiarów elementów drewnianych na tą podstawową wytrzymałość czy sztywność. Współczynniki te – to w rzeczywistości liczbowe wyrażenie efektu skali, któremu poświęcona jest niniejsza praca. W pracy podjęto próbę oszacowania efektu skali na doraźną wytrzymałość drewna. Pod terminem „efekt skali” (size effect, massztabnyj faktor) w doświadczeniach wytrzymałościowych rozumie się liczbowe wyrażenie wpływu wymiarów próbki lub rzeczywistego elementu konstrukcyjnego na średnią wytrzymałość lub średnią sprężystość (stałe sprężyste) drewna, w postaci ilorazu wytrzymałości (lub modułu sprężystości) stwierdzonych dla badanej próbki do wytrzymałości stwierdzonych przy badaniu małych próbek, stanowiących punkt odniesienia.

## Spis treści

1. Wstęp - geneza zagadnienia.....	6
2. Analiza literatury przedmiotu.....	12
2.1. Techniczne modele struktury drewna.....	12
2.1.1. Techniczny model makrostruktury drewna.....	13
2.1.2. Techniczny model mikrostruktury drewna.....	14
2.1.3. Techniczny model submikrostruktury drewna.....	16
2.2. Anizotropia sprężystych i wytrzymałościowych właściwości drewna – mechanika zniszczenia.....	18
2.3. Zastosowanie modeli ciała o anizotropii sprężystej do badań drewna	25
2.4. Zagadnienie podobieństw wyrobu i próbki przy eksperymentalnym badaniu mechanicznych właściwości drewna.....	30
2.5. Zagadnienie efektu skali.....	32
2.6. Badania wpływu efektu skali na mechaniczne właściwości drewna.....	37
2.6.1. Wpływ efektu skali na zginanie drewna.....	38
2.6.2. Wpływ efektu skali na wytrzymałość w próbie ściskania drewna.....	44
2.6.3. Wpływ efektu skali na ścinanie drewna.....	46
2.6.4. Wpływ efektu skali na wytrzymałość przy rozciąganiu drewna...	47
2.6.5. Wpływ efektu skali na stałe sprężyste drewna.....	49
2.6.6. Czynniki efektu skali.....	53
2.6.7. Określanie wpływu wymiarów i stanu naprężenia tarcicy na jej wytrzymałość.....	54
2.7. Wpływ wybranych wad na wytrzymałość drewna.....	61
2.7.1. Nienormalne zabarwienia drewna.....	61
2.7.2. Uszkodzenia spowodowane przez owady.....	62
2.7.3. Pozostałe wady znaczące.....	63



2.7.4. Wpływ zgnilizny na wytrzymałość drewna.....	65
2.7.5. Wpływ pęknięć (szczelin) na wytrzymałość drewna.....	66
2.7.6. Wpływ sękatości na wytrzymałość drewna.....	68
2.7.7. Wpływ skrętu włókien na wytrzymałość drewna.....	78
2.7.8. Wpływ twardzicy na wytrzymałość drewna.....	80
2.8. Wnioski wypływające z przeglądu literatury przedmiotu.....	82
3. Cel i zakres pracy.....	86
4. Hipoteza badawcza.....	87
5. Metodyka badań.....	88
5.1. Pozyskanie materiału do badań.....	88
5.2. Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy metodą wizualną.....	92
5.3. Charakterystyka materiału badawczego.....	95
5.4. Oznaczanie wilgotności drewna.....	97
5.5. Oznaczanie gęstości drewna.....	98
5.6. Charakterystyka stanowiska badawczego.....	99
5.7. Oznaczanie miejscowego modułu sprężystości przy zginaniu statycznym.....	101
5.8. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.....	106
5.9. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.....	108
6. Wyniki i analiza badań.....	111
6.1. Gęstość drewna.....	111
6.2. Miejscowy moduł sprężystości.....	115
6.3. Wytrzymałość na zginanie statyczne.....	117
6.4. Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien.....	119
6.5. Efekt skali.....	121
7. Wnioski.....	130
Literatura.....	131

## 1. Wstęp – geneza zagadnienia

Drewno pod wieloma względami przewyższa inne materiały konstrukcyjne. Główną zaletą drewna jest jego naturalna odnawialność. Przy wytwarzaniu materiałów konstrukcyjnych, takich jak stal, beton, tworzywa sztuczne i inne, zużywa się duże ilości surowców wyjściowych, których zapasy nie są odnawialne i stale się zmniejszają, a ponadto ich wydobycie wymaga znacznych nakładów energetycznych. Niezbędna do wytworzenia drewna energia słoneczna jest praktycznie nieograniczona.

Do zalet drewna zaliczyć należy jego małą gęstość i względnie wysoką jednostkową wytrzymałość i sztywność. I tak na przykład stal S235 (o gęstości  $\rho = 7,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) i drewno sosnowe ( $\rho = 0,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) mają wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio równe  $R_r = 400 \text{ MPa}$  i  $R_{rII} = 104 \text{ MPa}$ , a wytrzymałość jednostkową  $\frac{R_r}{\rho} = 51 \frac{\text{kPa}}{\text{kg/m}^3}$  i  $208 \frac{\text{kPa}}{\text{kg/m}^3}$ .

Do zalet drewna, w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi zaliczyć należy jego łatwą obrabialność, małą przewodność cieplną i elektryczną, wysoką dźwiękoizolacyjność, estetyczność, trwałość chemiczną.

Jednak własności drewna – istotnie wpływające na jakość wyrobów z drewna, takie jak mała wytrzymałość i sztywność w kierunkach prostopadłych do włókien, istotne zmiany własności mechanicznych przy wzroście wilgotności oraz wynikające z własności reologicznych pełzanie drewna (nawet w temperaturze pokojowej) wywołują w szeregu przypadków brak zaufania do drewna jako materiału konstrukcyjnego. Ten brak zaufania wynika w dużej mierze z niedostatecznego poznania własności mechanicznych drewna i wyrobów z drewna.

Różnorodność wyrobów z drewna i jego zastosowań wymusza odpowiednie dostosowanie metod obliczeń inżynierskich, spośród których szczególne miejsce zajmują obliczenia na wytrzymałość, sztywność i stateczność. Specyfika i złożoność tych obliczeń wynika z organicznego pochodzenia drewna; złożoności jego struktury, niejednorodności i anizotropii właściwości wytrzymałościowych i sprężystych. Nawet w obrębie jednego pnia czy deski właściwości wytrzymałościowe drewna mogą się zmieniać

w szerokich granicach; na przykład przy ściskaniu wzdłuż włókien do 20 – 35%, a przy rozciąganiu wzdłuż włókien – do 40 – 50% [Leontev 1970].

Najbardziej pracochłonnym zagadnieniem dotyczącym wytrzymałości drewna jest wytrzymałościowe sortowanie tarcicy, której rocznie produkuje się ponad 6 mln m<sup>3</sup> [Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005]. Poziom techniczny polskiego tartacznictwa jest niższy, w porównaniu z zachodnimi i północnymi krajami Unii Europejskiej. Opóźnienie oceniane jest na 30 – 40 lat. W tartakach tych krajów standardem jest stosowanie elektronicznych, bezstykowych urządzeń do pomiaru długości i ich podziału i do maszynowego wytrzymałościowego sortowania tarcicy [normy: DIN 4074:1989, PN-EN 519:2000, PN-EN 338:2003, EN 408 (2003), EN 384 (2004); prace: Dzbeński 1973, 1983, 1984, Glos 1982, Müller 2002]. Ze względu na to, że polskie tartacznictwo grupuje przeważnie małe i średnie zakłady przemysłowe, których nie stać na zakup i eksploatację maszyn sortowniczych, w Polsce stosuje się tzw. „wizualne metody sortowania wytrzymałościowego”. Ten „substytut” dla badaczy wytrzymałościowych właściwości materiałów wydaje się być co najmniej dziwny, chociaż metoda ta oparta jest na normach polskich i europejskich [BS 4798:1996, PN-EN 518:2000] i pracach badawczych [Dzbeński 2005].

W ostatnich czasach dynamicznie rozwinęła się nauka i praktyka nieniszczących badań struktury i właściwości fizycznych (w tym i mechanicznych) drewna. Tylko w monografii Buawa [2003] poświęconej nieniszczącym badaniom struktury drewna przytoczono ponad 600 pozycji literatury z tego przedmiotu.

Do najbardziej aktualnych problemów należą również opracowanie obliczeń i badań mechanicznych budowlanych elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego. Temu zagadnieniu poświęcone są prace szeregu badaczy [Serrano, Gustafsson 1999, Aicher, Radovic 1999, Choi 1998, Dandeville 1998, Gutkowski 1996, Moses, Pion 2003, Patton–Mallory 1998, Pizzo 2003, Dornyak 2005].

Szerokie wykorzystywanie płyt pilśniowych, wiórowych i drewna litego w meblarstwie wymusza konieczność stosowania specjalnych metod obliczeń i badań wytrzymałościowych. Specyficznych metod wymagają obliczenia i badania drewnianych opakowań, palet itp. Bez specjalnych obliczeń

i szczegółowego poznania struktury drewna niemożliwe jest badanie procesów mechanicznej obróbki drewna; w tym jego skrawania. Przy obliczeniach wytrzymałościowych drewna używanego do wyrobów elementów maszyn (rolniczych, tkackich, transportowych i innych) obok badań statycznych konieczne są badania dynamiczne uwzględniające drgania, uderzenia i zmęczenie materiału. Dotyczy to również sprzętu sportowego. Specjalnych obliczeń i badań wymagają połączenia drewna z metalami i tworzywami sztucznymi, zwłaszcza używanymi do naprawy, wzmacniania i konserwacji antycznych budowli i mebli przy zachowaniu zasad konserwatorskich [Balsamo 2001, Borchardt 2003, Nowak 2003, 2007, Smólski, Stępień 1998, Żaboklicki 1996, 2001].

Z analizy literatury technicznej wynika, że dotychczas w niedostateczny sposób zajmowano się techniczną stroną wytrzymałości drewna. W szczególności ważnym lecz mało poznany zagadnieniem jest wpływ własności struktury drewna na jego własności mechaniczne. Z zagadnieniem tym jest ściśle związane poznanie istoty efektu skali w drewnie. Jest to konieczne przy rozwiązywaniu jednego z głównych zadań technicznej nauki o drewnie – określenia zależności mechanicznych charakterystyk drewna od wymiarów badanych próbek i rzeczywistych elementów konstrukcyjnych. Zaznaczyć przy tym należy, że badania wytrzymałości i sprężystości drewna – materiału anizotropowego lepko–sprężysto–plastycznego metodami zapożyczonymi z badań materiałów izotropowych w obszarze naprężeń i odkształceń sprężystych budzi szereg zastrzeżeń [Łapka, Szyber 2007].

Oprócz wymienionych wyżej badań podstawowych, badania wytrzymałościowe drewna mają na celu dwa zadania praktyczne:

1. Umożliwienie porównania jakości różnych gatunków drewna i wykazanie wpływu na wytrzymałość różnych czynników, takich jak gatunek drewna, kierunek anizotropii, temperatura, wilgotność, impregnacja itp.,
2. Otrzymanie liczbowych charakterystyk wytrzymałościowych i sprężystych do obliczeń konstrukcji i wyrobów z drewna.

Wspomniana wyżej zmienność właściwości drewna wzdłuż promienia i wysokości pnia oraz obecność wad wymuszają konieczność badania próbek o wymiarach zbliżonych do rzeczywistych elementów konstrukcyjnych lub o takich wymiarach, że dalszy ich wzrost praktycznie na zmianę

wytrzymałości nie wpływa. Dotyczy to drugiego zadania. Natomiast na potrzeby pierwszego z wymienionych wyżej zadań celowe jest wykluczenie wpływu wad drewna na wyniki badań wytrzymałościowych. Jest to możliwe tylko przy stosowaniu próbek bez widocznych wad, orientacji zgodnej z kierunkami anizotropii drewna i o małych wymiarach.

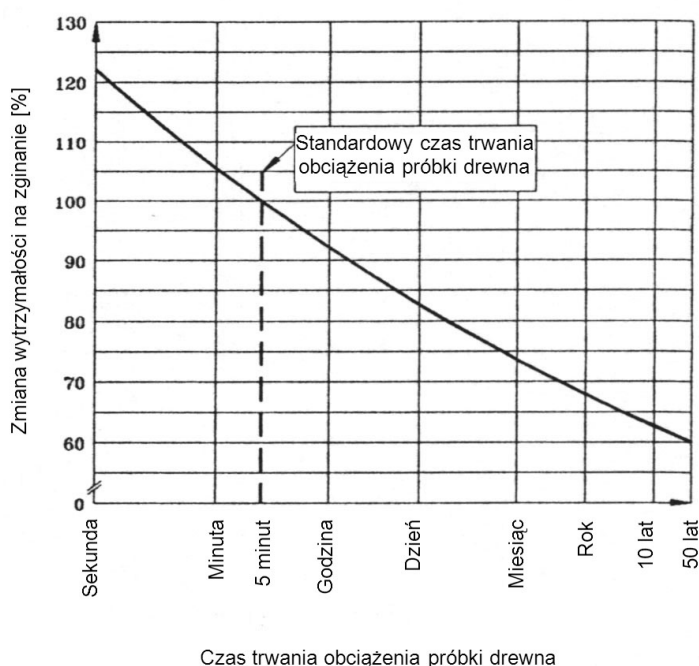
Wskazane jest zatem objęcie normami dwóch nurtów badań wytrzymałościowych drewna – jedne normy dotyczyć powinny badań elementów drewna o wymiarach konstrukcji budowlanych, a drugie – badań małych, czystych regularnych próbek o wymiarach i przekroju poprzecznym 20x20 mm lub 50x50 mm. Przy tym już w próbkach o przekroju 50x50 mm trudno uniknąć wad i niejednorodności (drobnych sęczków, zabytków i przeżywczeń), zwłaszcza w próbkach do badań na zginanie statyczne i udarność, mających przy tym przekroju długość 1 m. Stwierdzono, że w porównaniu do wyników badań przeprowadzonych na próbkach o przekroju 20x20 mm, badania na próbkach 50x50 mm zaniżają wytrzymałość na zginanie statyczne o 10 – 15 % [Leontev 1970, Bodig, Jayne 1982, Madsen 1992, Kollman, Cote 1968]. Natomiast próbki 50x50 mm, w porównaniu z badaniami elementów rzeczywistych konstrukcyjnych wymiarach, zawyżają wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien o 30 ÷ 40 %, a na zginanie statyczne o 30 ÷ 60 %. Różnice te z pewnością zaliczyć można do efektu skali. Ponadto z uwagi na lepko–sprężysto–plastyczną naturę drewna zachodzić może zmiana właściwości mechanicznych w czasie.

Uchodzące za wzorowe i reprezentatywne badania wpływu wielkości próbki i czasu ich obciążenia na wytrzymałość na zginanie, przeprowadzone w Forest Products Laboratory, Forest Service ([Wood 1951] za Madsenem 1992) prowadzą do dwóch wniosków:

- małe czyste próbki (25x25x400 mm) obciążane w ciągu 5 minut nie nadają się do oceny wytrzymałości na zginanie konstrukcyjnych elementów tartych,
- ze wzrostem czasu obciążenia wytrzymałość na zginanie wyraźnie zmniejsza się; w porównaniu z wytrzymałością przy obciążeniu trwającym 5 minut wytrzymałość przy obciążeniu trwającym jeden rok spadła do 62 % (rys. 1).

Ten drugi wniosek zgodny jest z teoretycznymi i eksperymentalnymi badaniami innych uczonych [Beljankin, Jacenko 1957, Barten'ev 1964, Borovikov 1970, Ivanov 1960, Sobolev 1970] według których przy statycznym obciążeniu drewna wyróżnić należałoby **wytrzymałość doraźną** (oszacowaną przy obciążeniu krótkotrwałym) i tzw. **wytrzymałość trwałą** (przy obciążeniu statycznym długotrwałym). Bez znajomości wytrzymałości trwałej, wynikającej ze zmian reologicznych drewna nie można na przykład wytłumaczyć uszkodzeń pni drzew na skutek okiści [Szyber 2004 a, b].

Zgodnie z normami wytrzymałość doraźną drewna bada się na drewnie suchym. Pamiętać jednak należy, że spadek wytrzymałości drewna do wytrzymałości trwałej jest tym szybszy im bardziej drewno jest wilgotne; drewno suche osiąga tę wytrzymałość po kilkumiesięcznym obciążeniu, a drewno wilgotne (na przykład świeżo ścięte) – już po jednym dniu obciążenia.



Rys. 1. Krzywa zwana „Madison Curve” – zależność zmiany wytrzymałości na zginanie od czasu obciążenia próbki drewna [Madsen 1992]

Ponadto wydaje się, że do celów obliczeń konstrukcyjnych należałoby wykorzystywać wyniki badań próbek o wymiarach porównywalnych do wymiarów rzeczywistych elementów konstrukcyjnych. Jednakże ze wzrostem wymiarów wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia wad

i niejednorodności, wzrastają techniczne problemy badań mechanicznych, niezbędna moc maszyn do badań, zużycie drewna (w próbach inwazyjnych) i koszty badań. Przy tym w wielu przypadkach wykorzystanie uniwersalnych maszyn wytrzymałościowych byłoby niemożliwe. Stąd też w praktyce mechanicznych badań drewna najczęściej dokonuje się na próbkach małych, o wymiarach i kształcie objętych normami, zgodnie z ustaloną metodyką. Przydatność wyników tych badań, które traktować należy jako podstawowe do obliczeń wytrzymałościowych, zależy od znajomości współczynników poprawczych opisujących wpływ wzrostu wymiarów elementów drewnianych na tą podstawową wytrzymałość czy sztywność. Współczynniki te – to w rzeczywistości liczbowe wyrażenie efektu skali, któremu poświęcona jest niniejsza praca.

## 2. Analiza literatury przedmiotu

### 2.1. Techniczne modele struktury drewna

Podobnie jak na inne materiały konstrukcyjne, na właściwości drewna ma wpływ jego budowa, rozpatrywana na każdym z trzech poziomów – makroskopowym, mikroskopowym i submikroskopowym. W budowie tej wyróżnić można elementy regularne, elementy nieregularne (niejednorodności) oraz wady. Z budowy wynika anizotropia drewna i sprężysto–lepkoplastyczny charakter drewna jako materiału.

Od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku rozpoczęła rozwijać się nauka zwana **techniczną budową drewna**, oparta na botanicznej anatomii drewna. Budowa ta wykorzystuje pewne uproszczone homogeniczne modele o charakterystycznych szczegółach na każdym z wymienionych wyżej poziomach, zbudowane dla potrzeb określenia wpływu obciążeń mechanicznych na strukturę drewna w elementach o różnych objętościach. W każdym z tych modeli drewno traktowane jest jako system elementów spośród których określa się elementy najszabsze – od których rozpoczyna się przy obciążeniu mechanicznym naruszenie regularnej struktury drewna. Zlokalizowanie tych ognisk zniszczenia i poznanie sposobu zniszczenia pozwalać ma na ustalenie ich wpływu na wytrzymałość całych elementów (próbek) oraz ustalenie przyczyn anizotropii wytrzymałościowych i sprężystych właściwości drewna.

Do twórców technicznej budowy drewna, z których prac korzysta się do dziś, zaliczyć można Moskalewą [1957, 1962], Perełygina [1957], Jacenko-Chmielewskiego [1954], Dinwoodie [1957], Kollmana [1967]. Cenne opracowania struktury drewna znaleźć można i w nowszych pracach Miller [1999], Core [1979], Kopač, Šali [2003], Tsounis [1991], Thibaut, Gril, Fournier [2001], Mishnaevsky, Qing [2008].

Sobolev [1979] zaproponował za elementy makrostruktury drewna przyjęcie elementów o wymiarach  $g \geq 0,1$  mm, widocznych gołym okiem, za elementy mikrostruktury drewna – elementy o  $0,001 \leq g < 0,1$  mm, a za elementy submikrostruktury – elementy o  $g < 0,001$  mm. W skład każdej z trzech poziomów budowy drewna wchodzi praktycznie inne elementy i inne też elementy zalicza się do niejednorodności budowy.



### 2.1.1. Techniczny model makrostruktury drewna

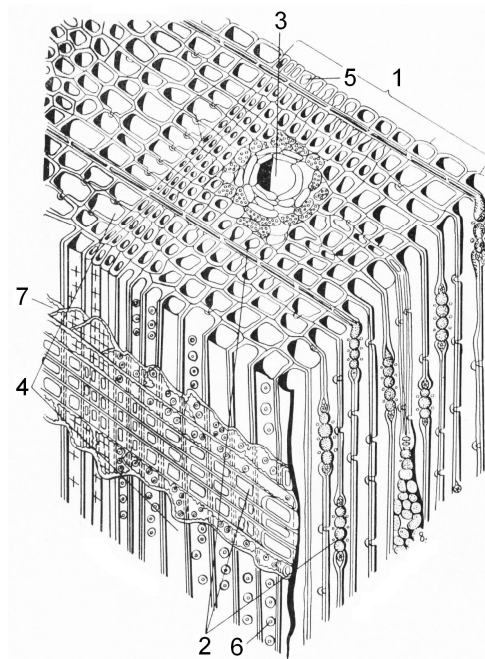
Do elementów makrostruktury zalicza się wczesne i późne drewno słoju rocznych [Kollman 1967, Perełygin 1971, Krzysik 1978, Sobolev 1979], promienie rdzeniowe o średniej i dużej szerokości, duże przewody żywiczne i duże naczynia. Rozłożenie tych elementów w objętości „czystego” drewna (bez niejednorodności) przyjmuje się za regularne; to znaczy ich ilość w każdej jednostce objętości drewna jest jednakowa. Oznacza to możliwość traktowania drewna w próbce lub wyrobie o objętości  $V_1 > 1 \text{ cm}^3$  jako materiału quasi jednorodnego. W tej objętości ilość makroelementów jest na tyle duża, że mimo zmienności własności poszczególnych elementów, średnie wartości poszczególnych charakterystyk wytrzymałościowych makrostruktury drewna są wysoce prawdopodobne. Z dostateczną dokładnością można przy tym przyjąć ciągłość struktury drewna, pomijając istniejące w drewnie puste przestrzenie (choć ogólnie wiadomo, że drewno jest materiałem porowatym). Pozwala to na stosowanie do modelowania drewna w makroobjętościach równań takich jak do typowych odkształcalnych ośrodków ciągłych.

Jednak otrzymywane przy powyższych założeniach wyniki teoretycznych i eksperymentalnych badań drewna charakteryzują w makroobjętościach jedynie drewno „czyste” bez sęków, pęknięć, zabytków, przeżywień, rdzenia, falistości i skrętu włókien, chodników owadzych itp. Te niejednorodności można potraktować jako **niejednorodności pierwszego rodzaju**. W terminologii technicznej zwykło się je nazywać **wadami drewna** (zgodnie z normą PN-66/D-01000).

Jednakże wyniki badań eksperymentalnych drewna czystego z próbek o różnych wymiarach i kształcie są często istotnie różne. Tłumaczy się to ukrytymi niejednorodnościami pierwszego rodzaju, a także **niejednorodnościami drugiego rodzaju**, za które uważa się drobne odchylenia orientacji słoju rocznych względem krawędzi próbki i kierunków anizotropii drewna, mikropęknięcia, duże otwory przewodów żywicznych i naczyń, różne krzywizny słoju rocznych, niejednakową grubość słoju rocznych itp.

### 2.1.2. Techniczny model mikrostruktury drewna

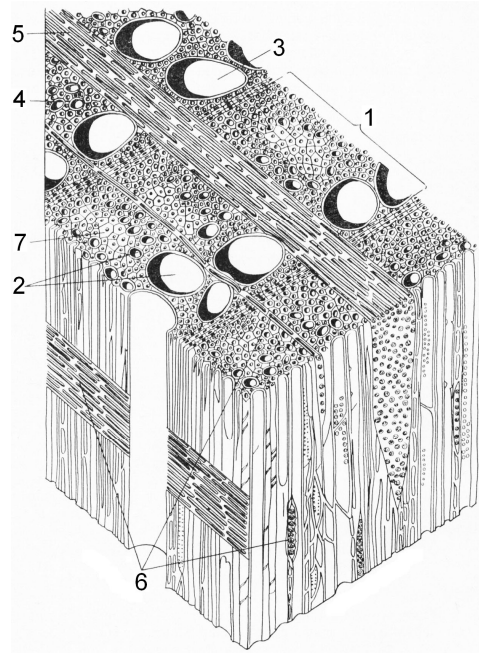
Do elementów modelu mikrostruktury drewna zaliczyć można tracheidy, naczynia i włókna libroformu, tworzą one regularne systemy komórkowe (rys. 2 – 4).



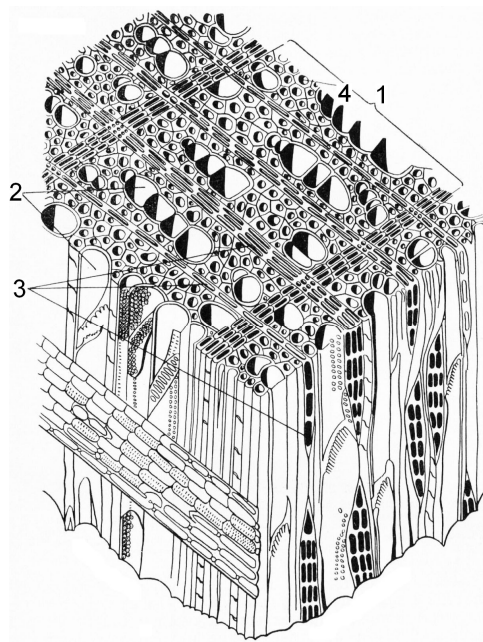
Rys. 2. Schemat mikroskopowej budowy drewna sosny [Vichrov 1959]: 1 – słój roczny, 2 – promień rdzeniowy, 3 – przewód żywiczny, 4 – tracheidy drewna wczesnego, 5 – tracheidy drewna późnego, 6 – jamki, 7 – tracheidy promieniowe

Do najbardziej schematycznego przedstawienia mikrobudowy drewna zaliczyć można model traktujący drewno jako plaster miodu [Mishnaevsky, Qing 2008]. Ze specyficzności i różnej budowy komórkowej oddzielnych części drewna pnia – drewna wczesnego, drewna późnego, promieni rdzeniowych wynikają różnice właściwości mechanicznych tych części. Za niejednorodności w tym modelu przyjmuje się przewody żywiczne i naczynia o świetle znacznie większym niż światła (rozmiary) regularnych elementów mikrostruktury. Do tych niejednorodności zalicza się także tracheidy (cewki), których grubość ścianek jest znacznie mniejsza od średniej grubości ścianek tracheid, parenchymatyczne komórki promieni rdzeniowych – zwykle skrajnie niejednorodne i o znacznie niższych wytrzymałościach niż komórki

parenchymatyczne podstawowej struktury drewna. Wymienione niejednorodności nazwać można **niejednorodnościami trzeciego rodzaju**.



Rys. 3. Schemat mikroskopowej budowy drewna dębu [Vichrov 1959]: 1 – przyrost roczny, 2 – naczynia, 3 – duże naczynia drewna wczesnego, 4 – małe naczynia drewna późnego, 5 – szeroki promień rdzeniowy, 6 – wąski promień rdzeniowy, 7 – włókno libroformu (włókno drzewne)



Rys. 4. Schemat mikroskopowej budowy drewna brzozy [Vichrov 1959]: 1 – przyrost roczny, 2 – naczynia, 3 – promienie rdzeniowe, 4 – włókno libroformu (włókno drzewne)

Najmniejsza próbka mikrostruktury powinna mieć objętość  $V_2 = 1 \text{ mm}^3$  [Sobolew 1979]. Próbka o tej objętości jest na tyle duża by zawierać dostatecznie dużo elementów mikrostruktury i na tyle mała by rozróżniać średnie charakterystyki drewna wczesnego i późnego. Drewno na tym poziomie można tylko umownie rozpatrywać jako materiał ciągły. Oceniając wytrzymałość i sztywność drewna na tym poziomie należałoby postępować tak jak w przypadku materiałów porowatych w rodzaju pianobetonu.

### 2.1.3. Techniczny model submikrostruktury drewna

Badania własności mechanicznych drewna w objętościach mniejszych od  $1 \text{ mm}^3$  sprowadzają się do analizy właściwości mechanicznych oddzielnych komórek traktowanych jak próżne naczynia (bez treści koloidalnych). Poznanie zachowania się oddzielnych komórek pod obciążeniem wyjaśniałoby odkształcenia i zniszczenie drewna w większych objętościach. Podstawą struktury drewna jest substancja drzewna ścianek komórek, która na poziomie submikroskopowym jest skrajnie niejednorodna. Substancja ta składa się głównie z molekułów celulozy osadzonych w ośrodku amorficznym składającym się z ligniny. Jak wiadomo celuloza ma budowę micelną. Micelą celulozową nazywa się lokalne zagęszczenie (pęczek) łańcuchów celulozowych, o długości około 60 nm i grubości  $6 \div 9 \text{ nm}$ . Łańcuchy celulozowe w obrębie miceli są do siebie równoległe i zorientowane równoległe do osi podłużnej pnia; natomiast różnej długości końce tych łańcuchów tworzą układ amorficzny, nieuporządkowany. Ścianki komórek zbudowane są z włókien (fibryli), utworzonych z wiązek miceli poprzeplatanych łańcuchami hemiceluloz. Szkielet drewna na poziomie submikroskopowym zbudowany jest więc z włókien drzewnych.

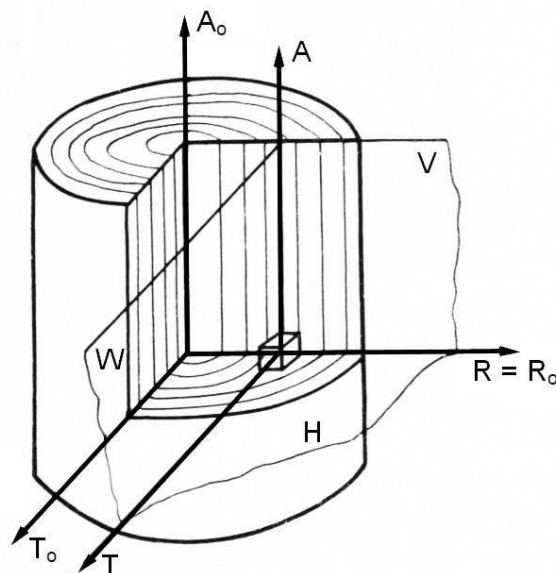
Badając mechaniczne właściwości drewna na poziomie submikroskopowym należałoby rozpatrywać substancję drzewną ścianki komórki o objętości  $V_3 = 10^{-7} \text{ mm}^3$ . W tej objętości można przyjąć substancję drzewną za ciągłą i jednorodną, ponieważ elementów składowych (mikrofibryl) byłoby dostatecznie dużo, a ponieważ różnice właściwości pomiędzy nimi są nieznaczne, to wpływałyby jedynie na średnie wartości charakterystyk mechanicznych substancji ścianki komórkowej. Za niejednorodności na tym

poziomie można przyjąć kapilary wypełnione substancjami koloidalnymi, jamki w ściankach – w otoczeniu których obserwuje się ostre odchylenia kierunku fibryl, a także każde inne odchylenie od regularnej submikrostruktury drewna.

Z powyższych rozważań wynika, że ognisko zniszczenia drewna pod obciążeniem zlokalizowane jest w jego najslabszym miejscu – przy niejednorodnościach. Klasycznym zarodkiem zniszczenia elementu konstrukcyjnego jest lokalne pęknięcie. Stąd też najnowsze trendy w projektowaniu elementów drewnianych opiera się na traktowaniu drewna jako materiału idealnie krucho–elastycznego, zgodnie z teorią liniowej mechaniki ciała podatnego na pęknięcia i złamania (linear elastic fracture mechanics LEFM), której – w odniesieniu do drewna poświęcono szereg nowych prac i opracowano kilka modeli teoretycznych. W pracach tych jako model materiału elastoplastycznego poddanego działaniu różnej wilgotności stosowano model Kelvina–Voigta [Smith, Vasic 2003, Vasic 2000, Vasic 2002, Bone, Wawrzynek, Ingraffea 1987, Bostrom 1992, Vasic, Smith, Landis 2005, Aliabadi, Rooke 1993, Davids, Landis, Vasic 2003, Smith, Landis, Gong 2003, Vasic, Ceccotti 2009, Stanzl–Tschegg, Tan, Tschegg 1995, Holmberg 1999, Coureau, Gustafsson, Persson 2006, Aicher, Gustafsson, Haller 2002, Gustafsson 2003, Peterson 1992, Zalph, McLain 1992, Dubois, Randriambololona, Hanhijarvi, Hunt 1998, Toratti 1992].

## 2.2. Anizotropia sprężystych i wytrzymałościowych właściwości drewna – mechanika zniszczenia

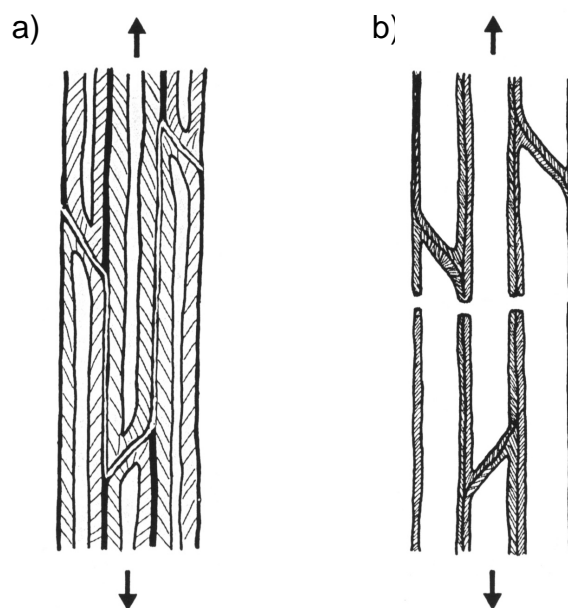
Już w latach dwudziestych ubiegłego wieku stwierdzono zależność fizycznych właściwości drewna od kierunków anatomicznej budowy pnia drzew w postaci **anizotropii cylindrycznej** z trzema płaszczyznami symetrii: poprzeczną  $H$ , promieniową  $V$  i styczną  $W$  (rys. 5). Linie przecięcia się tych płaszczyzn wyznaczają trzy kierunki anizotropii drewna i zarazem główne kierunki anatomiczne:  $A \parallel A_0$  – wzdłuż włókien,  $R = R_0$  – promieniowy oraz  $T \parallel T_0$  – styczny do obranego słoja rocznego i prostopadły do obu poprzednich kierunków.



Rys. 5. Anizotropia cylindryczna pnia drzew z trzema płaszczyznami symetrii [Sobolev 1979]

Mimo, że twierdzenie o anizotropii cylindrycznej pnia jest w pełni zasadne, to jej zastosowanie do rzeczywistych obiektów z drewna, zwłaszcza w postaci prętów nie jest celowe. Wynika to z szeregu utrudnień z uwagi na różne wymiary i kształty obiektów, różnych stosunków wymiarów i różnego położenia obiektów względem głównych kierunków anizotropii. Do większości obiektów drewnianych największe zastosowanie ma założenie o anizotropii ortogonalnej (ortotropii) [Jayne 1972, Goodman, Bodig 1970, Madsen 1992, Bucur 2003]. Najczęściej stosuje się przy tym liniowy model ortotropii drewna, ale ostatnio również model nieliniowy [Tabei, Wu 2000, Boone 1987, Bostrom 1992].

Anizotropia drewna wynika z uporządkowania położenia strukturalnych elementów drewna. Jak to już wyżej zaznaczono najczęściej wyróżnia się trzy poziomy budowy drewna: submikro-, mikro- i makrobudowę drewna. Na każdym z tych poziomów są inne przyczyny anizotropii drewna. Zaznaczyć należy, że wyróżnić też można pięć poziomów struktury wpływających na anizotropię drewna [Bodig, Jayne 1982]: 1) materia komórek drzewnych, 2) ścianka komórki, 3) cała komórka, 4) grupa komórek, 5) całość różnego rodzaju tkanek drewna. Na poziomie submikroskopowym funkcję nośną spełniają środkowe warstwy ścianek komórek prozenchymatycznych, o wydłużonym kształcie. Są one najgrubsze i zawierają mikrofibryle ułożone praktycznie równoległe do podłużnej osi komórki (odchylając się od tej osi pod małym kątem 5 – 15°). Wytrzymałość na rozciąganie celulozy na tym kierunku wynosi 10 GPa, a moduł sprężystości podłużnej  $E = 11,6 \div 44,6$  GPa [Kollmann 1972, Mark 1968]. Wytrzymałość ścianek komórek na rozciąganie wzdłuż osi komórki wynosi 0,3 – 1,0 GPa; przy tym wytrzymałość ścianek komórek drewna późnego (700 MPa) jest dwukrotnie większa niż komórek drewna wczesnego (350 MPa). Stąd też typowe sposoby zniszczenia cewek drewna późnego polegają na rozdzieleniu połączeń z sąsiadującymi komórkami (rys. 6 a), a cewek drewna wczesnego – na rozerwaniu ścianek (rys. 6 b) [Bodig, Jayne 1982].

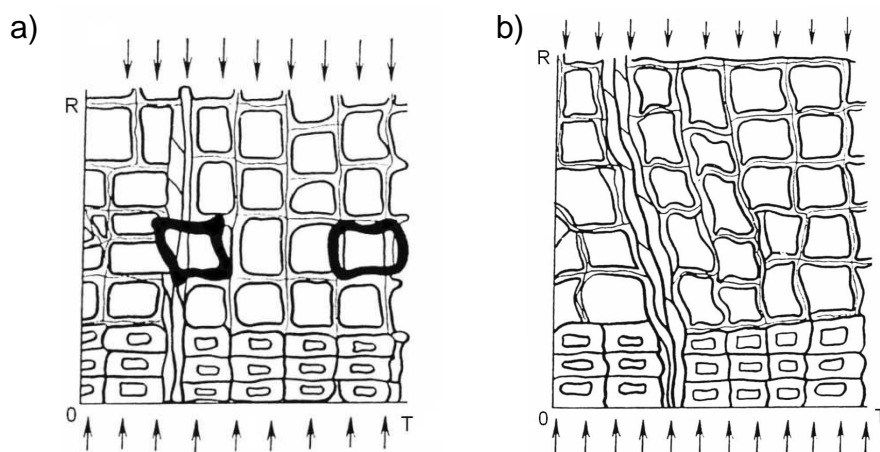


Rys. 6. Typowe sposoby zniszczenia drewna przy rozciąganiu wzdłuż osi komórek:  
a) rozdzielenie połączeń z sąsiadującymi komórkami cewek drewna późnego,  
b) rozerwanie ścianek cewek drewna wczesnego [Bodig, Jayne 1982]

Wytrzymałość i moduł sprężystości ścianek komórek na kierunkach poprzecznych do osi podłużnej komórki jest istotnie niższa od wyżej podanych wartości, ponieważ w błonach komórkowych na kierunku mikrofibryl znajdują się wolne przestrzenie (kapilary) wypełnione wodą.

Najbardziej wyraźna różnica pomiędzy właściwościami wytrzymałościowymi i sprężystymi na kierunkach równoległym i prostopadłym do włókien tłumaczy się odkształceniami odpowiednich elementów mikrostruktury. Przy obciążeniu wzdłuż włókien rzeczywistą powierzchnią pracującą na rozciąganie lub ściskanie jest powierzchnia rurowych przekrojów poprzecznych komórek, mających przy tym stosunkowo wysoką sztywność i wytrzymałość na wyboczenie. To tłumaczy największą wytrzymałość drewna na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien. Przy działaniu obciążenia prostopadle do włókien ścianki tracheidy są nie tylko rozciągane lub ściskane ale także zginane, co dokonywane jest przez skoszenie (ściananie) komórek.

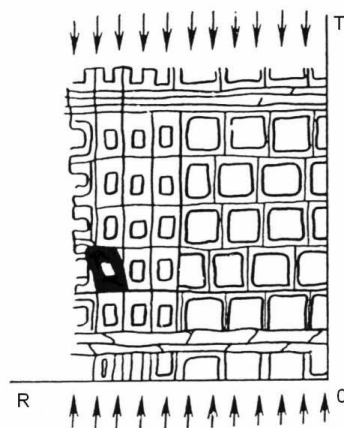
Przy ścisaniu poprzecznym w kierunku promieniowym odkształcane jest głównie drewno wczesne słoja rocznego. Z uwagi na cienkość ścianek wczesne tracheidy łatwo tracą stateczność (rys. 7), pociągając za sobą wyboczenie promieni rdzeniowych. Na rysunku 7 a, pogrubioną linią zaznaczono charakterystyczne kształty odkształceń komórek drewna wczesnego, a całkowity obraz zniszczenia – na rysunku 7 b, według Moskalewej [1957] i Krasulina [1962].



Rys. 7. Odkształcenie drewna przy ścisaniu w kierunku promieniowym: a) kształt poszczególnych komórek w strefie drewna wczesnego, b) fragmenty przekroju poprzecznego drewna uwidaczniające całkowite zniszczenie komórek [Sobolev 1979]



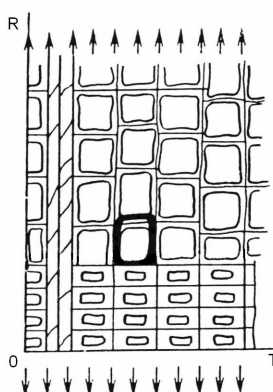
Na wytrzymałość drewna przy poprzecznym ściskaniu w kierunku stycznym (rys. 8) duży wpływ mają początkowe naprężenia wynikające z różnicy wysuszenia drewna wczesnego i późnego słoików rocznych badanych próbek (wysuszonych przed próbą ściskania do normatywnej wilgotności 12%). Różnice te prowadzą do wstępnego rozciągania warstw drewna późnego i nieznacznego ściskania warstw drewna wczesnego. We wstępnej fazie ściskania próbki powoduje to odciążenie drewna późnego i dociążenie drewna wczesnego. W tej fazie obciążeniu przeciwstawia się drewno wczesne. Jednakże przy dalszym wzroście obciążeń próbki o wytrzymałości drewna na ściskanie styczne decyduje sztywność warstw drewna późnego, znacznie większa od sztywności warstw drewna wczesnego, zwłaszcza że na tym kierunku rzędy komórek drewna wczesnego nie są regularne, a komórki rozłożone chaotycznie. Ponadto promienie rdzeniowe przy ściskaniu na kierunku stycznym są bardziej podatne na odkształcenia niż na kierunku promieniowym. Wszystko to tłumaczy fakt, że moduły sprężystości na kierunku stycznym są mniejsze od modułów na kierunku promieniowym.



Rys. 8. Odkształcenie drewna przy ściskaniu w kierunku stycznym [Sobolev 1979]

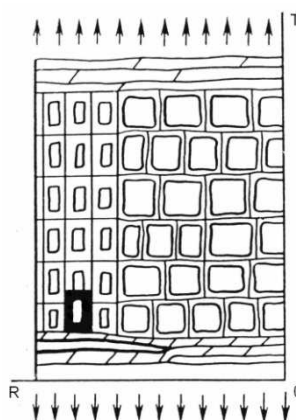
Wytrzymałość drewna na rozciąganie w kierunku promieniowym jest większa od wytrzymałości w kierunku stycznym. Przyczyny tego są podobne jak przy ściskaniu – bardziej regularne warstwy drewna wczesnego na kierunku promieniowym (rys. 9), położenie promieni rdzeniowych zgodnie z kierunkiem sił rozciągających, działanie warstw drewna późnego jak sztywnych przepon powstrzymujących poprzeczne odkształcenia warstw drewna wczesnego.

Zniszczenie drewna w tym przypadku zachodzi przez rozerwanie ścian komórek drewna wczesnego, a zginanie rzędów komórek praktycznie nie zachodzi.



Rys. 9. Odształcenie drewna przy rozciąganiu w kierunku promieniowym [Sobolev 1979]

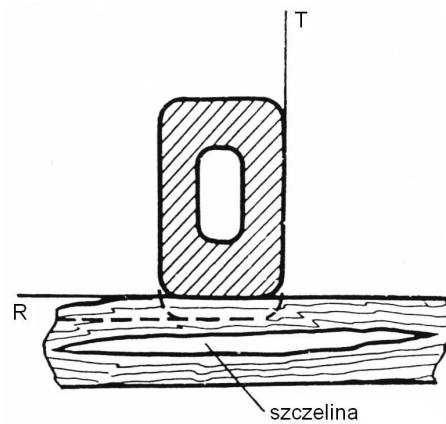
Przy rozciąganiu próbki w kierunku stycznym (rys. 10 a) na początkową fazę odkształceń próbki wpływają, spowodowane suszeniem drewna, wstępne naprężenia rozciągające drewna późnego i naprężenia ściskające warstw drewna wczesnego.



Rys. 10 a. Odształcenie drewna przy rozciąganiu w kierunku stycznym [Sobolev 1979]

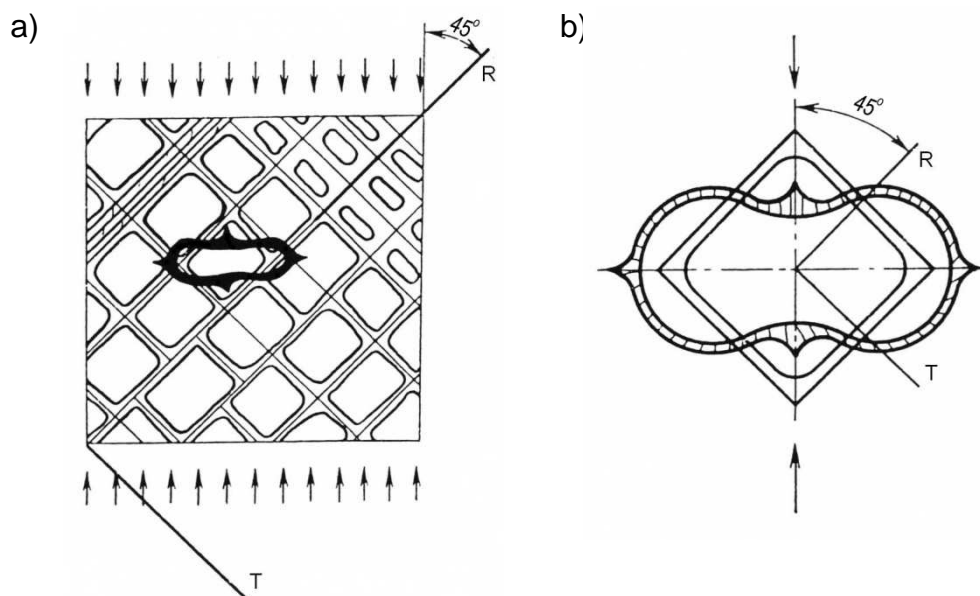
W trakcie badań rozciąganie próbki zwiększa naprężenia rozciągające słoju drewna późnego. W efekcie naprężenia drewna późnego są znacznie większe od średnich naprężeń drewna próbki. Tak naprężone grupy drewna późnego poprzedzielane są promieniami rdzeniowymi, prostopadłymi do kierunku obciążenia. Ogniskiem zniszczenia próbki jest więc zwykle miejsce rozwarstwienia na pograniczu sąsiedztwa drewna późnego ze słabymi

komórkami miększowymi promienia rdzeniowego. Objawia się to w postaci szczelin prostopadłych do kierunku rozciągania (rys. 10 b):



Rys. 10 b. Przykład rozwarstwienia drewna na pograniczu drewna późnego i promienia rdzeniowego w postaci szczeliny prostopadłej to kierunku rozciągania [Sobolev 1979]

Na kierunkach pośrednich pomiędzy promieniowym i stycznym; na przykład przy ściskaniu pod kątem  $45^\circ$  (rys. 11 a i b), ognisko zniszczenia próbki zwykle jest w drewnie wczesnym, a charakterystyczne odkształcenia komórek, traktowanych na przekroju poprzecznym jako statycznie niewyznaczalne prostokątne ramy, to spłaszczenie przekroju komórki do figury przypominającej ósemkę.



Rys. 11. Odkształcenie drewna przy ściskaniu pod kątem  $45^\circ$  do kierunku promieniowego: a) fragment przekroju drewna wczesnego, b) charakterystyczne spłaszczenie przekroju komórki drewna wczesnego [Sobolev 1979]

Różnica sprężystych i wytrzymałościowych właściwości drewna na kierunkach promieniowym i stycznym jest względnie mała (1,5 – 3 razy). Różnica ta przy wzroście objętości obiektów początkowo wzrasta (przy przejściu od objętości submikroskopowych do mikroskopowych i dalej do minimalnych objętości makroskopowych), a przy dalszym wzroście objętości próbek różnica ta maleje. Przy tym moduł sprężystości podłużnej drewna wczesnego w kierunku promieniowym jest większy od modułu sprężystości w kierunku stycznym. Ze wzrostem gęstości drewna moduł wyraźnie wzrasta. W drewnie późnym powoduje to, że materiał staje się praktycznie izotropowy [Farruggia, Perre 2000]. Tak więc praktycznie można przyjąć, że właściwości mechaniczne drewna w kierunkach poprzecznych promieniowym i stycznym są podobne. Krzywizna słoików rocznych i ich różna orientacja względem krawędzi dostatecznie dużego obiektu z drewna dodatkowo sprzyja zacieraniu się różnic pomiędzy różnymi kierunkami leżącymi w płaszczyźnie prostopadłej do włókien drzewnych. W tym przypadku najbardziej uzasadnione jest traktowanie drewna jako ciała transwersalno–izotropowego (monotropowego) [Sobolew 1979, Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005, Bodig, Jayne 1982, Bodig, Goodman 1973, Goodman, Bodig 1970].

### **2.3. Zastosowanie modeli ciała o anizotropii sprężystej do badań drewna**

Badanie mechanicznych właściwości drewna powinno być poprzedzone wyborem odpowiedniego modelu drewna, opartego na analizie wyników wcześniejszych badań struktury i właściwości drewna. Dobrze dobrany model powinien dostatecznie dokładnie odwzorowywać drewno w rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym i pozwalać na opisywanie zachowania się drewna pod obciążeniem za pomocą matematycznych równań mechaniki ciała odkształcalnego. Jak dowodzą liczne badania [Bielankin, Jacenko 1957, Borowikow 1970, Bykowskij 1958, Iwanow 1960, Ugolew 1971, Kollman 1962, 1967, Bach, Pentoney 1968, Bryan, Schniewind 1965, Madsen 1992, Bodig, Jayne 1982, Sobolew 1956, 1958, 1959, 1975, Goodman, Bodig 1970, 1973, Cowin 1979, Nielsen 1985, 1992, Bodig, Goodman 1973, Schneider, Phillips 1994, Houška, Koc 2000, Garcia 2000, Hoffmeyer 1989, Jayne, Bach, Pentoney 1968], najbardziej trafne, dostatecznie oddające zachowanie się drewna pod wpływem obciążenia mechanicznego jest traktowanie drewna jako ciała sprężysto–lepko–plastycznego przy tym niejednorodnego i porowatego. Całkowite odkształcenie takiego ciała pod działaniem sił zewnętrznych składa się zwykle z odkształcenia sprężystego natychmiastowego, z odkształcenia sprężystego rozwijającego się w czasie (zwanego opóźnieniem sprężystym lub odkształceniem elastycznym), które można uważać za odkształcenie sprężysto–lepkie oraz z odkształcenia plastycznego – również rozwijającego się w czasie.

Praktycznie od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku nastąpił rozwój nowej dyscypliny związanej z lepko–sprężysto–plastycznym charakterem drewna zwany teorią uszkodzonych materiałów lepko–sprężystych (the damaged viscoelastic materials = DVM). Teoria ta uwzględnia pęknięcia i szczeliny i inne wady drewna (głównie sęki) stanowiące naturalne niejednorodności drewna. Teoria DVM rozwijana jest głównie w Danii i Kanadzie [Nielsen, Kousholt 1980, Nielsen 1985, 1987, 1990, 1991, 1992, Madsen 1973, 1976, Clouser 1959, Hoffmeyer 1990]. Teoria ta, potwierdzona doświadczalnie, pozwala na śledzenie rozwoju pęknięć w pobliżu wady,

pełzania materiału i oszacowanie jakości drewna, jego trwałości i wytrzymałości długotrwałej – zwanej tu „wytrzymałością resztkową” (residual strength).

Tak jak większość materiałów służących do budowy elementów maszyn i konstrukcji również drewno zaliczyć można do materiałów składających się ze szkieletu – posiadającego właściwości sprężyste oraz wypełniacza (zwykle amorficznego) o właściwościach lepkich [Bielankin, Jacenko 1957, Sobolew 1975, Bodig, Jayne 1982]. Istota tworzenia się i rozwoju odkształceń sprężystych dla takich materiałów jest taka sama. Przy odkształceniach poniżej określonej wartości proces odkształcenia ciała w czasie dzieli się na dwa okresy. W pierwszym okresie tworzą się natychmiastowe odkształcenia sprężyste, a w drugim zachodzi opóźnienie sprężyste. W tym okresie naprężenie sprężyste rozwijają się w czasie według krzywej asymptotycznie zbliżające się do pewnej wartości.

Na poziomie makroskopowym za szkielet traktować można warstwy drewna późnego słoju rocznych, a za wypełniacz – drewno wczesne. Szkielet mikrostruktury drewna zbudowany jest ze ścianek komórek, tworzących przestrzenną siatkę. Wypełniaczem tego szkieletu są wodne roztwory koloidalne i powietrze. Za szkielet submikrostruktury drewna przyjmuje się siatkę łańcuchów celulozowych, a za wypełniacz szkieletu – ligninę i wodę.

Odształcenie sprężyste natychmiastowe drewna, natychmiastowo reagujące na zmianę obciążenia, rosnące z prędkością równą prędkości wzrostu obciążenia i natychmiastowo zanikające po jego ustąpieniu, wynika z odkształcenia celulozowego szkieletu drewna. Opóźnienie sprężyste związane jest z lepkim oporem stawianym przez wypełniacz przy przemieszczeniu szkieletu. Plastyczne odkształcenia drewna polegają na połączeniu się trwałych, rozwijających się w czasie lokalnych uszkodzeń szkieletu.

Ilościowy stosunek wymienionych składowych odkształcenia jest różny u różnych materiałów. W drewnie największe wartości osiągają odkształcenia sprężyste, chociaż od początku obciążenia zachodzą nieznaczne odkształcenia trwałe [Bielankin, Jacenko 1957, Sobolew 1975, Bodig, Jayne 1982]. Wartość odkształceń plastycznych, następujących po sprężystych, jest niewielka, jeśli nie liczyć przypadku ściskania drewna w poprzek włókien, co wynika z kształtu komórek i ich ukierunkowania wzdłuż włókien. Natomiast relacja między

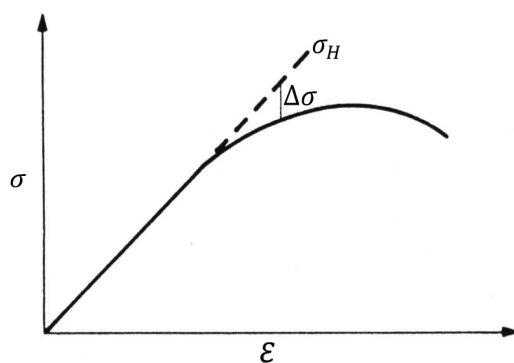
wartościami odkształceń sprężystych natychmiastowych i sprężystych opóźnionych w czasie zależy głównie od wilgotności drewna.

Przy doraźnych, krótkotrwałych badaniach własności mechanicznych drewna, które dotyczą niniejszej pracy, udział odkształceń sprężystych w całkowitych odkształceniach pod wpływem sił zewnętrznych jest duży. Dlatego w dalszej części pracy stosuje się modele sprężystej anizotropii drewna.

Oznacza to możliwość stosowania prostoliniowej zależności naprężeń ( $\sigma$ ) od odkształceń ( $\varepsilon$ ), do granicy proporcjonalności  $R_{pr}$ , w postaci prawa Hooke'a ( $\sigma = E\varepsilon$ ). Do obliczeń naprężeń poza granicą proporcjonalności O'Halloran [1973] (za Bodig, Jayne 1982) zaproponował równanie krzywoliniowe:

$$\sigma = \sigma_H - \Delta\sigma = E\varepsilon - A\varepsilon^n, \quad (1)$$

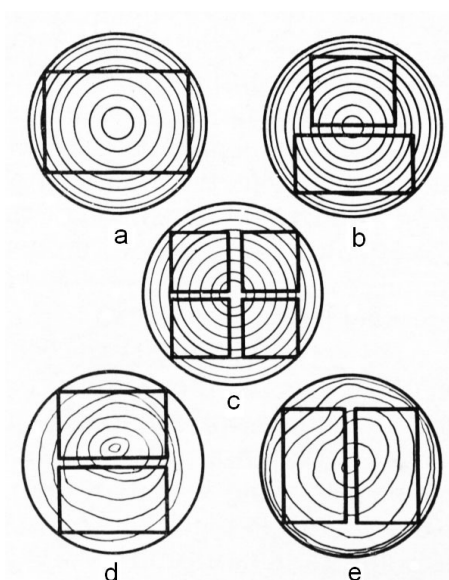
w którym składnik  $\sigma_H = E\varepsilon$  oblicza się z prawa Hooke'a, a składnik  $\Delta\sigma = A\varepsilon^n$  – oznacza odchylenie naprężeń od obliczonych z prawa Hooke'a (rys. 12). Stałe  $A$  i  $n$  określa się doświadczalnie.



Rys. 12. Nieliniowy model do obliczania naprężeń poza granicą proporcjonalności zaproponowany przez O'Hallorana [Bodig, Jayne 1982]

Wyroby z drewna o grubości przekroju poprzecznego powyżej 10 cm cechuje różnorodna, przypadkowa orientacja słoików rocznych i innych elementów względem krawędzi wyrobu (rys.13 a, b, c). Również siły działające na wyroby zorientowane są różnorodnie względem elementów makrostruktury. W tym przypadku niemożliwe jest wskazać kierunek promieniowy i styczny dla całego wyrobu lub próbki, zwłaszcza z pni z ekscentrycznym rdzeniem

(rys. 13 d) lub skrzywionymi słojami rocznymi (rys. 13 e). Biorąc pod uwagę różnice właściwości mechanicznych drewna w dowolnych kierunkach prostopadłych do kierunku wzdłuż włókien są niewielkie i dla każdego z tych kierunków można posłużyć się wartościami średnimi to dla wyrobu w makroobjętościach (o przekroju  $F \geq 100 \text{ cm}^2$  i objętości  $V \geq 1000 \text{ cm}^3$ ) można drewno traktować jako ciało transwersalno-izotropowe (monotropowe).



Rys. 13. Orientacja słojów rocznych względem krawędzi wyrobu z drewna o grubości przekroju poprzecznego powyżej 10 cm: a, b, c) pień z rdzeniem koncentrycznym, d) pień z rdzeniem ekscentrycznym, e) pień z nieregularnym układem słojów rocznych [Sobolev 1979]

Według Sobolewa [1979] do wyrobów o przekroju poprzecznym  $20 < F < 100 \text{ cm}^2$ , w zależności od przypadku można stosować modele ciała ortotropowego lub transwersalno-izotropowego. W praktyce inżynierskiej spotyka się dużą ilość wyrobów o przekroju poprzecznym  $1 < F \leq 20 \text{ cm}^2$  (klepka, elementy mebli, sprzętu sportowego i maszyn itp.). Przy obliczeniach i badaniach tych wyrobów należałoby uwzględnić różnice właściwości sprężystych i wytrzymałościowych drewna w różnych kierunkach prostopadłych do włókien. Wymusza to zastosowanie ortotropowego modelu drewna. Najbardziej charakterystyczną ortotropową objętością drewna jest objętość  $V = 10 \text{ cm}^3$  zawierająca dostateczną ilość elementów struktury by oszacować średnia wartości mechanicznych właściwości drewna.



Badania skrawania drewna, jego obróbki hydrotermicznej, nasycanie, parowanie itp. wiążą się także z zagadnieniami wytrzymałości i sztywności drewna. Jednak w tym przypadku badania drewna powinny dotyczyć próbek o jeszcze mniejszej objętości, współmiernych z wymiarami słoja rocznego. W tym przypadku badania drewna powinny iść w trzech kierunkach – badania właściwości warstwy drewna wczesnego, warstwy drewna późnego i słoja rocznego jako całości. Oddzielne warstwy drewna wczesnego i późnego słoja rocznego można przy tym traktować jako ciało quasijednorodne i quasiciągłe.

Nieliczne badania właściwości warstw wczesnego i późnego drewna słoja rocznego [Panferow 1949, Farruggia, Perre 2000] wskazują na znaczne różnice tych właściwości. Na przykład moduł sprężystości warstwy późnej słoja rocznego drewna sosnowego przy ściskaniu w kierunku promieniowym ( $E = 1860$  MPa) jest 2,56 razy większy od modułu warstwy wczesnej ( $E = 722$  MPa). Wytrzymałość drewna późnego na rozciąganie jest 3 ÷ 4 razy większa, a na zginanie 4 ÷ 5 razy większa od wytrzymałości drewna wczesnego. Charakterystyczną objętością oddzielnej warstwy drewna słoja rocznego jest objętość  $V = 1 \text{ mm}^3$ , w obrębie której drewno traktować można jako ciało praktycznie ciągłe, quasijednorodne i ortotropowe.

Badania wykazały jednak [Sobolew 1979], że przy wzroście objętości próbki od  $1 \text{ mm}^3$  do  $1 \text{ cm}^3$  obserwuje się największy wpływ czynnika skali, ponieważ najbardziej zaznacza się tu wpływ różnicy właściwości mechanicznych drewna wczesnego i późnego. U modrzewia na przykład wytrzymałość na rozciąganie drewna późnego jest 3 ÷ 4 razy większa niż wczesnego i 4 ÷ 5 razy większa przy zginaniu [Wichrow 1949]. Na podstawie znajomości właściwości drewna wczesnego i późnego można wnioskować o właściwości drewna całej próbki. Do oszacowania modułów sprężystości w kierunku promieniowym ( $r$ ) i stycznym ( $t$ ) na tej podstawie Sobolew [1979] wyprowadził np. następujące wzory:

$$E_r = \frac{E_{rw} E_{rp}}{E_{rw}k + E_{rp}(1 - k)}, \quad (2)$$

$$E_t = E_{tw}(1 - k) + E_{tp}k, \quad (3)$$

gdzie:  $k$  – udział drewna późnego w objętości próbki, dla sosny  $k = 0,26 \div 0,29$  [Ugolew 1975].

## 2.4. Zagadnienie podobieństw wyrobu i próbki przy eksperymentalnym badaniu mechanicznych właściwości drewna

Projektowanie wyrobów z drewna oparte jest zwykle na wynikach doświadczeń przeprowadzonych na drewnie w warunkach podobnych do warunków eksploatacji wyrobu. To podobieństwo w szeregu przypadków okazuje się być tylko pozornym. Rzeczywiste procesy odkształceń realnych wyrobów często różnią się od procesów odkształceń badanych próbek danego wyrobu. Na całokształt podobieństwa przy badaniach drewna składają się podobieństwa: geometryczne, statyczne, kinetyczne, temperaturowo-wilgotnościowe i strukturalne.

Najprościej spełnić **geometryczne podobieństwo** wyrobu i próbki. Zmniejszając wymiary próbek dla dogodności eksperymentu nie powinno się zmieniać ich kształtu. Często jednak o tej zasadzie się zapomina i wyniki badań są przez to wypaczone. Zachowanie tak pojętego podobieństwa geometrycznego przy rozpatrywanym w dalszej części przeglądu literatury efekcie skali sugeruje – rozpatrywanie tego efektu w funkcji objętości próbki, co prowadzić może do poważnych błędów. Jak wynika bowiem z szeregu badań [Bodig, Jayne 1982, Madsen, 1990, 1992, Madsen, Nielsen 1978, 1976, Madsen, Momoi 1991, Bohannan 1966, Lam 1987, 1990] na właściwości mechaniczne drewna wpływa głównie zmiana długości próbki, a wpływ wymiarów poprzecznych jest nieznaczny. Efekt skali sprowadza się wtedy do tzw. efektu długości (length effect).

Bardziej złożone, ale także niezbędne jest spełnienie **statycznego podobieństwa eksperymentu**, ponieważ rodzaj stanu naprężeń i ich wartość w czasie badań powinny odpowiadać tym wskaźnikom w warunkach eksploatacji. Ścisłe spełnienie warunku podobieństwa statycznego jest niemożliwe, ponieważ naprężenia oblicza się w oparciu o założenie pewnego wyidealizowanego środowiska, tylko w pewnym stopniu zbliżonego do rzeczywistego wyrobu z drewna. Poza tym na realną wielkość naprężeń i odkształceń wpływają stany naprężeń i odkształceń poprzedzające badania, wywołane przez, różne warunki wzrostu, transport, suszenie, mechaniczną obróbkę itp.

Pamiętać przy tym należy, że badając efekt skali bada się zwykle wytrzymałość doraźną, podczas gdy wyroby z drewna obciążone są zwykle długotrwale – albo obciążeniami stałymi albo wielokrotnie zmiennymi. Autor nie stwierdził istnienia badań wpływu efektu skali na wytrzymałość trwałą lub wytrzymałość zmęczeniową drewna.

Nie mniej ważnym przy eksperymentach jest zachowanie **podobieństwa kinetycznego**, którego istota polega na tym, że prędkości wzrostu odkształceń i naprężeń w badanych próbkach i wyrobach z drewna powinny być jednakowe. Przy badaniach tak skrajnie niejednorodnego materiału jak drewno, ścisłe spełnienie podobieństwa kinetycznego jest niemożliwe. Różne są bowiem gradienty zmian naprężeń i odkształceń w wyrobach o różnych wymiarach i istotna różnica w ilości energii zużywanej na odkształcenia. Można natomiast utrzymywać średnią prędkość obciążenia próbki.

Ważnym jest również **podobieństwo temperaturowo-wilgotnościowe**. Wytworzenie podobieństwa temperaturowego nie jest trudne. Natomiast wytworzenie warunków podobieństwa wilgotnościowego jest zagadnieniem złożonym. Złożony system pustych przestrzeni, kapilarów i jamek o różnych wymiarach tworzy niejednorodne opory przemieszczania się wody wewnątrz drewna, co sprzyja tworzeniu się wewnątrz wyrobu z drewna stref o różnej wilgotności. W procesie wysychania lub nawilżania drewna, zwłaszcza w dużych objętościach, powoduje to dodatkowe wstępne naprężenia. Uzyskanie jednakowego rozkładu wilgotności w próbkach o różnych wymiarach jest praktycznie niemożliwe. W tym przypadku otrzymać tylko można podobieństwo średnich wilgotności.

Jeszcze trudniej wytworzyć warunki do **podobieństwa strukturalnego** dla próbek i wyrobów o różnych wymiarach. Niejednorodność słoistej struktury drewna, niejednakowy udział procentowy warstw drewna wczesnego i późnego w próbkach i wyrobach są głównym powodem odchylenia rzeczywistej struktury od założonej, regularnej. Wszystkie wykazane różnice w omówionych rodzajach podobieństw przy badaniach próbek o różnych wymiarach są przyczyną zależności wytrzymałości i sztywności drewna od efektu skali.

## 2.5. Zagadnienie efektu skali

Zagadnienie wpływu wymiarów próbki na średnie wartości mechanicznych charakterystyk materiałów konstrukcyjnych interesuje uczonych od lat trzydziestych ubiegłego wieku. Wynika to z konieczności obliczeń konstrukcyjnych wyrobów istotnie różniących się wymiarami. Pierwsze badania dotyczyły materiałów kruchych – włókien szklanych i kwarcowych, soli kamiennej i kalafonii [Aleksandrow, Żurkow 1933, Weibull 1939, 1939a]. Stwierdzono zmniejszenie się wytrzymałości na rozciąganie i zmniejszanie się rozrzutu wyników doświadczeń przeprowadzonych na prętach cylindrycznych ze wzrostem średnicy i długości prętów. Tłumaczono to obecnością defektów w próbkach. Zakładano, że im bardziej niebezpieczne jest uszkodzenie struktury tym rzadziej ono występuje w jednostkowej objętości materiału, a w dużych próbkach prawdopodobieństwo wystąpienia tych niebezpiecznych uszkodzeń jest znacznie większe niż w małych. Przy tym za minimalną wytrzymałość dużej próbki uważano wytrzymałość najsłabszej małej części próbki. Powierzchniowe defekty uważano za bardziej niebezpieczne niż wewnętrzne defekty struktury. Przy tym ze wzrostem temperatury wszystkie uszkodzenia stawały się równie niebezpieczne i efekt skali nie zaznaczał się. Ponadto na obniżenie wpływu wymiarów próbki wpływało zmniejszenie prędkości obciążenia.

Na powyższej podstawie postawiono hipotezę o statystycznej naturze efektu skali, co potwierdziły gruntowne, przeprowadzone na dużej liczbie prób badania Weibulla [1939] (za Sobolewem [1979], Bodig, Jayne [1980], Madsen [1992], Trustrum [1987]). **Statystyczna teoria kruchej wytrzymałości** – Weibulla oparta była na założeniu, że wytrzymałość całego wyrobu określona jest wytrzymałością jego najsłabszego elementu (weakest link). Prawdopodobieństwo zniszczenia materiału  $S(\sigma)$  przy naprężeniach  $\sigma \geq R$  według tej teorii jest równe:

$$S(R) = 1 - e^{-Vm(R)}, \quad (4)$$

gdzie:

$$m(R) = \left( \frac{R}{\sigma_0} \right)^m, \quad (5)$$

$\sigma_0$  i  $m$  – stałe materiałowe ( $\sigma_0$  – minimalnie możliwa wytrzymałość materiału,  $m$  – parametr kształtu).

Zależność wartości tzw. „kruchej” wytrzymałości od objętości badanej próbki według Weibulla jest równa:

$$R_{kr} = \frac{A}{V^{\frac{1}{m}}} = AV^{-\frac{1}{m}}, \quad (6)$$

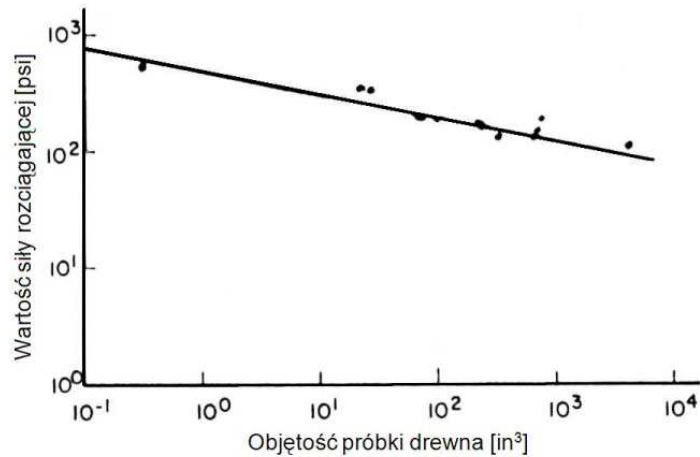
gdzie  $A$  – stała zależna od charakteru stanu naprężeń i rodzaju materiału,  $\frac{1}{m}$  – stała uwzględniająca niejednorodność materiału, dla idealnie jednorodnych materiałów  $m = \infty$  (wtedy  $R_{kr} = A$ ).

Teoria Weibulla prowadzi do wniosku, że wytrzymałość  $R_2$  próbki o objętości  $V_2$  ma się do wytrzymałości  $R_1$  i próbki o mniejszej objętości  $V_1$  następująco:

$$\frac{R_2}{R_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^m. \quad (7)$$

Potwierdził to Johnson [1953] badając przydatność rozkładu Weibulla do określenia prawdopodobieństwa wytrzymałości materiałów kruchych. Bohannon [1966] był jednym z pierwszych, który zastosował Weibullowską teorię najsłabszego ogniwa do drewna, badając wytrzymałość belek klejonych.

Teorię Weibulla potwierdziły też badania Barreta [1974] wpływu efektu skali na wytrzymałość na rozciąganie prostopadłe do włókien czystych próbek z dąglezji (rys. 14) badania Man [1976] (za Madsenem 1992) na rozciąganych próbkach z drewna sosnowego (Southern Pine) oraz Trustruma [1987].



Rys. 14. Wpływ efektu skali na wytrzymałość na rozciąganie prostopadłe do włókien czystych próbek drewna daglezji [Bodig, Jayne 1982]

Według Kontorowej [1943, 1946] wartość „kruchej” wytrzymałości od objętości badanych dużych próbek jest równa:

$$R_{kr} = \sigma_0 - \sqrt{A \ln V + B}, \quad (8)$$

a od objętości małych próbek:

$$R_{kr} = a + \frac{b}{V}, \quad (9)$$

gdzie:  $\sigma_0, A, B, a, b$  – stałe zależące od stanu naprężeń materiału.

Stosując wzór [7] otrzymać można ujemne wartości wytrzymałości, co pozbawione jest sensu logicznego, tym nie mniej statystyczna teoria „kruchej” wytrzymałości dla niektórych materiałów z wyraźną niejednorodnością [Czczulin 1954, 1960, 1963] potwierdza teorię Weibulla [Sedrakjan 1958].

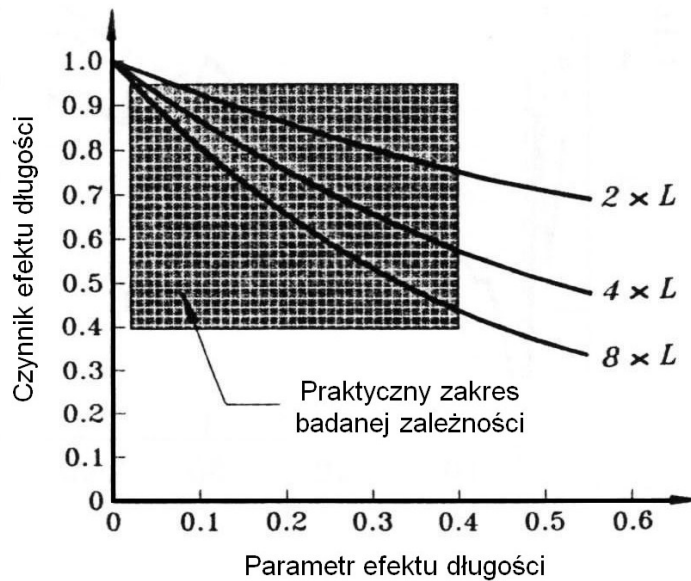
W powyższych teoriach materiał rozpatruje się jako system szeregowo lub równoległe połączonych elementów o różnej wytrzymałości z defektami o różnym stopniu zagrożenia. Nie uwzględniają jednak one problemu rozkładu naprężeń wstępnych w strefach mikroniejednorodności. Znane są tylko średnie wartości tych naprężeń wynikające z obliczeń opartych na podstawie hipotez odkształcalnego ciała stałego (w tym na podstawie zasady utwardzania). W wyniku wystąpienia mikroniejednorodności, makroskopowo jednorodny stan

naprężeń jest w rzeczywistości niejednorodny przy rozpatrywaniu strukturalnych mikroobjętości ciała. Powstają naprężenia drugiego i trzeciego rodzaju, nakładające się na podstawie naprężenia „pierwszego rodzaju”, otrzymane z obliczeń wyrobów z materiału przyjętego za ciągły i jednorodny. Wynikają z tego koncentracje naprężeń, których położenie jest przypadkowe, stochastyczne. W miejscach koncentracji naprężeń mogą powstawać lokalne naruszenia struktury próbki nawet we wstępnych stadiach prób. W ten sposób objawia się efekt skali w materiałach „bez wad” [Barteniew 1964, Bołotin 1965].

Reasumując, zarówno w okresie do lat sześćdziesiątych [Barteniew 1960, Wołkow 1960, Dawidenkow 1960, Sobolew 1960, Szapow 1960] jak i w czasach obecnych nie ma wspólnego poglądu na istotę efektu skali. Podstawowe różnice zdań dotyczą oceny decydującej roli tego lub innego czynnika stanowiącego przyczynę powstania efektu skali. Istnieją zwolennicy statystycznych, energetycznych i innych hipotez natury tego efektu, przy tym metoda statystyczna znalazła największe uznanie.

Statystyczna teoria efektu skali utrzymuje [Madsen 1992], że logarytm wytrzymałości materiału jest liniowo zależny od logarytmu długości, szerokości i grubości przekroju oraz objętości próbki. Linia ta jest skośna opadająca do osi odciętych, a jej współczynnik kierunkowy jest zwany **parametrem efektu skali** (the size effect parameter). Oparta na tym założeniu metoda określania efektu skali jest prosta ale wymaga dużej liczby próbek (gwarantującej statystyczną wiarygodność) o kilku wymiarach (trzech lub więcej różnych długości, szerokości, grubości i objętości). Przy tym największe próbki powinny być 4 ÷ 5 razy większe od najmniejszych.

Wyróżnia się [Schultrich, Fahrman 1979, Trustrum 1987, Madsen 1992, Buchannan 1986] też „czynnik skali” (size effect factor) definiowany jako stosunek wytrzymałości przy podwójnym wzroście wymiarów (długości, szerokości lub grubości). Wykazano zależność pomiędzy czynnikiem skali i parametrem efektu skali przy podwójnym i poczwórnym wzroście długości próbki (rys. 15).



Rys. 15. Zależność pomiędzy czynnikiem skali i parametrem efektu skali przy wzroście wymiarów próbki [Madsen 1992]

Powyższe rozważania dotyczą efektu skali w materiałach kruchych. Chociaż istnienie efektu skali w drewnie związane jest ze znacznie bardziej złożoną strukturą niż struktura materiałów kruchych, to badania efektu skali tych materiałów stanowią podstawę do porównawczych badań różnych wymiarów próbek z drewna.



## 2.6. Badania wpływu efektu skali na mechaniczne właściwości drewna

Jak wiadomo drewno jest materiałem niejednorodnym, zawierającym elementy strukturalne o różnej sztywności i wytrzymałości, a także puste przestrzenie. Wyroby z drewna w zależności od ich wymiarów zawierają naturalne (sęki, skręt włókien itp.) i technologiczne wady (pęknięcia w trakcie suszenia, powierzchniowe uszkodzenia przy obróbce mechanicznej itp.). Cylindryczny kształt słoików rocznych przy zwykle płaskich ortogonalnych krawędziach większości wyrobów z drewna jest przyczyną powstawania dodatkowych niejednorodności i nawet zmiany charakteru anizotropii próbek o różnych wymiarach.

Przy kształtowaniu próbek z drewna należy uwzględnić wpływ nie tylko niejednorodności struktury ale i naprężenie drugiego i trzeciego rzędu powstałe w wyniku tej niejednorodności. W wielu przypadkach naprężania te mogą mieć decydujący wpływ na powstanie lokalnego ogniska zniszczenia i w konsekwencji zniszczenia całej próbki. Zniszczenie zapoczątkowane jest wtedy gdy najslabsze ogniwo znajduje się w strefie najbardziej naprężonej. Jeśli nie, to wytrzymałość próbki może być znacznie wyższa niż by to wynikało ze słabego ogniwa [Madsen 1992]. Jest to szczególnie widoczne przy zginaniu. Ponieważ lokalizacja niejednorodności w objętości próbki ma naturę przypadkową, statystyczną to i rozkład tych dodatkowych naprężeń ma wyraźnie statystyczny charakter, co wywołuje efekt skali w obciążanych próbkach. Również suszenie próbek z drewna wpływa na efekt skali, w związku z naprężeniami powstającymi w wyniku anizotropii suszenia w kierunkach promieniowym i stycznym i różnic w stopniu wysuszenia drewna wczesnego i późnego [Ugolew 1971].

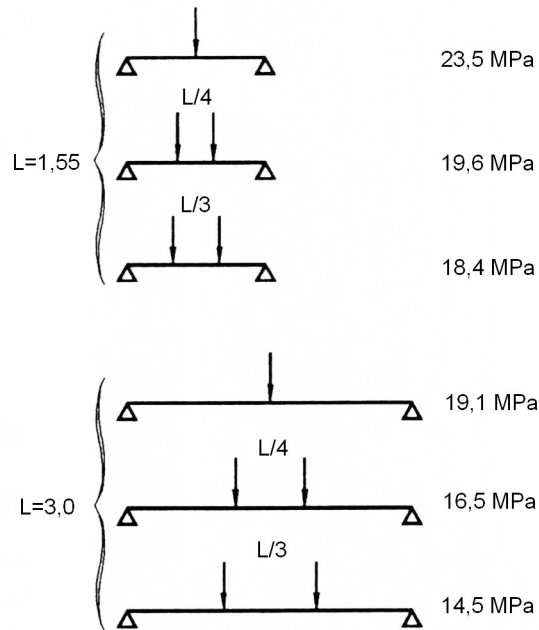
Z uwagi na sprężysto–lepko–plastyczną naturę drewna wstępne naprężenia wynikające z suszenia i innych czynników związanych z poprzedzającymi badaniem wytrzymałościowe stanami próbki nie są niezmiennie. Wewnątrz próbek zachodzi ciągły proces relaksacji naprężeń wstępnych. Ze zjawiskiem relaksacji naprężeń w procesie obciążenia próbki związany jest wpływ prędkości obciążania – niejednakowy dla próbek różnych wymiarów. Uniemożliwia to uzyskanie podobieństwa kinetycznego. Również

i inne podobieństwa, oprócz geometrycznego, są trudne do uzyskania. W zależności od rodzaju stanu naprężenia wytworzonego w próbkach efekt skali jest różny.

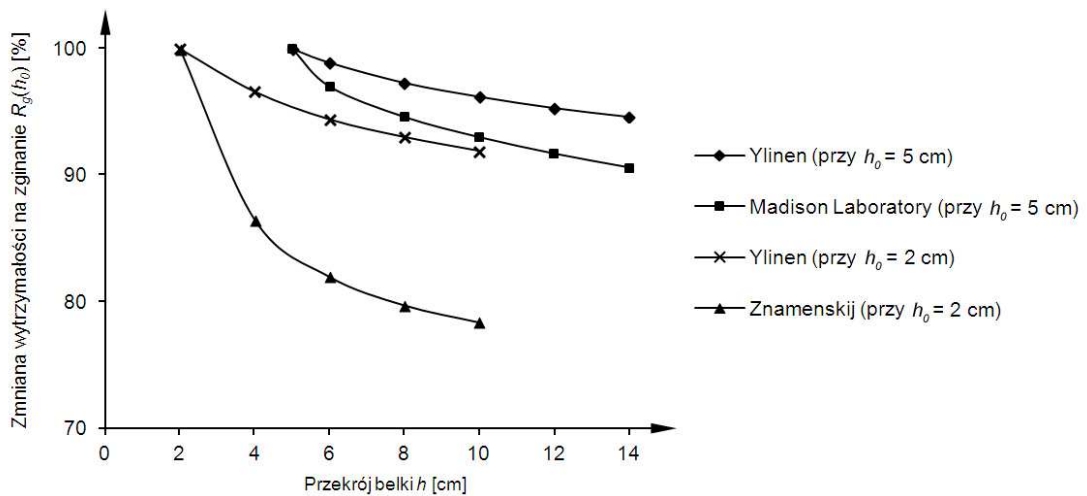
### 2.6.1. Wpływ efektu skali w próbie zginania drewna

Przed analizą wyników wpływu efektu skali na wytrzymałość drewna na zginanie celowe wydaje się zwrócić uwagi na jeszcze jeden aspekt zagadnienia, opublikowany przez Madsena [1992]. Przeprowadził on badania wytrzymałości tarcicy iglastej (z daglezi) na zginanie w dwóch seriach po sto belek z tarcicy klasy SS i klasy Z o przekroju 38x140 mm i długościach prześwitu  $L = 1,55$  m i  $L = 3,0$  m obciążonych naporą po środku prześwitu i trójpunktowo z dwoma naporami ustawionymi symetrycznie w odległości  $L/4$  i  $L/3$  (rys. 16). Pomimo, że materiał wszystkich belek pochodził z tego samego źródła, wytrzymałość na zginanie różniła się istotnie; średnie z poszczególnych serii zmieniały się od 23,5 do 14,5 MPa, a średnia z całej populacji 18,6 MPa. Tłumaczono to tym, że im na bardziej wąskim odcinku belki skupiony był maksymalny moment gnący tym mniejsze było prawdopodobieństwo wystąpienia na tym odcinku „najśłabszego ogniwa” belki. Do obliczeń naprężeń niszczących stosowano zwykły wzór  $\sigma_g = M_g/W_g$ . Zdaniem autora publikacji zastosowanie tego wzoru do belek drewnianych jest zbyt dużym uproszczeniem realnego procesu zginania. Na ten aspekt zagadnienia badacze efektu skali na zginanie drewna nie zwracali dotychczas uwagi.

Wraz ze wzrostem długości belek wytrzymałość drewna na zginanie obliczona tym samym wzorem istotnie maleje (rys. 16). Madsen zwraca przy tym uwagę na fakt, że zastosowanie do obliczeń naprężeń zginających statystycznej teorii wytrzymałościowej (Statistical Strength Theory) wszystkie te różnice niweluje, a średnia wytrzymałość na zginanie badanych próbek wynosi 15,4 MPa. Przy sile poprzecznej działającej po środku belki tylko 10% belki jest objęte największymi naprężeniami rozciągającymi.



Rys. 16. Badanie wytrzymałości na zginanie tarcicy iglastej z jedną naporą ustawioną po środku prześwitu i dwoma naporami ustawionymi symetrycznie [Madsen 1992]



Rys. 17. Zmniejszanie się wytrzymałości na zginanie  $R_g$  przy wzroście wysokości przekroju dla belek z „czystego” drewna [Savkov 1965, Sobolev 1979, Ylinen 1942]

Pierwsze badania wpływu wymiarów próbki na mechaniczne właściwości drewna przeprowadzone w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Znamenskij (za Sobolewem 1979) badał wpływ wymiarów poprzecznych belek drewnianych na zginanie statyczne i stwierdził, że ze wzrostem wysokości przekroju belki wytrzymałość się zmniejsza. Za porównawczy przyjął przekrój najmniejszy 2x2 cm. Zwiększano jedynie wysokość przekroju  $h \geq h_0 = 2$  cm. Stosunek

wytrzymałości na zginanie o tej wysokości  $R(h)$  do wytrzymałości belki porównawczej  $R(h_0)$  autor nazwał **współczynnikiem skali  $K_Z$** :

$$K_Z = \frac{R(h)}{R(h_0)} = 0,73 + \frac{0,54}{h}. \quad (10)$$

Z wyników badań Madison Laboratory (USA) według Savkova [1965] określono następującą zależność współczynnika skali od wysokości przekroju belki odniesionej do próbek o wysokości  $h_0 = 5$  cm:

$$K_{ML} = 1 - 0,07 \sqrt{\frac{h}{5} - 1}. \quad (11)$$

Według Ylinena [1942] współczynnik  $K_{Y2}$  (obniżenia wytrzymałości na zginanie ze wzrostem wysokości przekroju), odniesiony do belki o wysokości przekroju  $h_0 = 2$  cm, jest równy:

$$K_{Y2} = \frac{1,06 (1 + 0,16h)}{1 + 0,2h}, \quad (12)$$

a odniesiony do wytrzymałości belek o wysokości przekroju  $h_0 = 5$  cm jest równy:

$$K_{Y5} = \frac{1,11 (1 + 0,16h)}{1 + 0,2h}. \quad (13)$$

Powyższe cztery zależności otrzymano porównując wytrzymałość małych i dużych próbek z „czystego” drewna, bez wad, przy stałej szerokości przekroju – 2 cm i długości prześwitu 1 m. Stąd też wartości współczynników  $K$  są bliskie jedności przy ( $h_0 = 2$  cm  $K = 0,784 \div 0,966$ , a przy  $h_0 = 5$  cm  $K = 0,906 \div 0,97$ ). Na rysunku nr 17 zależności te przedstawiono w procentach. We wszystkich przypadkach wyraźnie zaznacza się zbliżanie się wartości współczynników  $K$  do pewnych asymptot.

Badania efektu skali w przypadku tarcicy są utrudnione z uwagi na dużą zmienność właściwości mechanicznych drewna. Jest to szczególnie widoczne

przy badaniach tych właściwości w poszczególnych klasach jakości (sortowanych wytrzymałościowo). Na przykład bardzo obszerne badania tarcicy ze świerka norweskiego dokonane przez szereg badaczy [Schneider, Phillips 1991, Burger, Glos 1995, Steiger 1996, Gehri 1997, Gindl, Teischinger 2002, Steiger, Fontana 2005, Steiger, Arnold 2009] wykazały możliwość wyróżnienia aż 12 klas wytrzymałościowych tarcicy z uwagi na wytrzymałość na zginanie, rozciąganie wzdłuż włókien, ściskanie wzdłuż włókien, moduł sprężystości przy rozciąganiu wzdłuż włókien i gęstość drewna. Z badań przeprowadzonych zgodnie z normą EN 338 wynikało, że wytrzymałość na zginanie  $R_g$  zmieniała się od 14 do 50 MPa, wytrzymałość na rozciąganie  $R_{rII}$  zmieniała się w granicach  $8 \div 30$  MPa, na ściskanie  $R_{cII}$  zmieniała się w przedziale  $16 \div 29$  MPa, moduł sprężystości przy rozciąganiu  $E_{rII}$  zmieniał się w przedziale  $7 \div 16$  GPa, a gęstość – w przedziale  $350 \div 550$  kg/m<sup>3</sup>. W badaniach Steigera i Arnolda [2009] określano też stosunki wytrzymałości na zginanie do modułu sprężystości przy zginaniu  $R_g/E_g$  (zmieniający się średnio od 24/5000 do 63/18000), stosunki wytrzymałości na rozciąganie  $R_{rII}$  i na ściskanie  $R_{cII}$  do wytrzymałości na zginanie  $R_g$ , stosunek pomiędzy wytrzymałością  $R_{cII}$ , a gęstością  $\rho$  oraz stosunki pomiędzy modułami sprężystości przy zginaniu  $E_g$ , rozciąganiu  $E_{rII}$  i ścisaniu  $E_{cII}$ .

Przy wzroście wytrzymałości na zginanie od 20 do 47 MPa stosunek  $R_{rII}/R_g$  zmieniał się od 0,6 do 0,75, a stosunek  $R_{cII}/R_g$  zmniejszał się od 0,87 do 0,7. Przy wzroście gęstości od 385 do 460 kg/m<sup>3</sup> wytrzymałość na ściskanie  $R_{cII}$  wzrastała od 27 do 32 MPa. Przy wzroście modułu sprężystości przy zginaniu  $E_g$  od 5,1 GPa do 19 GPa moduł sprężystości przy rozciąganiu  $E_{rII}$  wzrastał od 5,13 GPa do 17,5 GPa. Podobnie przy wzroście  $E_g$  od 5,6 GPa do 22 GPa moduł sprężystości przy ścisaniu  $E_{cII}$  wzrastał od 9 do 18 MPa.

Badania kanadyjskie [Madsen 1992] nad wpływem wysokości przekroju na wytrzymałość na zginanie, przeprowadzone na daglezi i choinie kanadyjskiej wykazały liniowe zmniejszanie się wytrzymałości przy wzroście szerokości przekroju. Grubość przekroju była w każdej serii badań taka sama – 38 mm, wysokość zmieniała się od 89 mm do 235 mm, a prześwit zwiększał się proporcjonalnie do wysokości – w stosunku jak 17:1 (tabela 1).

Tabela 1. Zależność współczynnika skali przy wytrzymałości drewna na zginanie w odniesieniu do wysokości przekroju 184 mm [Madsen 1992]

Wysokość przekroju [mm]	89	140	184	235
Współczynnik skali $K$	1,27 – 1,31	1,13 – 1,15	1,0	0,83 – 0,86

W stosunku do belki o wysokości 89 mm wytrzymałość na zginanie belki o wysokości 235 mm spadła o 35%.

Doświadczenia przeprowadzone na próbkach z wadami wykazały wyraźnie większe obniżenie wytrzymałości drewna na zginanie przy wzroście wymiarów przekroju poprzecznego belek. Perełygin [1971], badając belki o przekrojach 5x5, 15x30 i 20x40 cm, stwierdził obniżenie wytrzymałości o 43%. Rabinowicz [1940] – za Sobolewem stwierdził obniżenie wytrzymałości o 31% przy zwiększeniu przekroju z 3x4 na 15x6,5 cm. Iwanow [1950] stwierdził obniżenie wytrzymałości na zginanie o 35% porównując wyniki badań próbek o wymiarach 2x2, 10x10 i 10x15 cm. Wytrzymałość na zginanie desek iglastych przy ustawieniu na kant zmniejszyła się o 15%, a tylko o kilka procent – przy ustawieniu na płask, przy zwiększeniu jej wymiarów: grubości z 40 do 50 mm, szerokości 100 – 150 mm i długości w świetle 600 – 2600 mm.

Według niektórych badaczy [Savkov 1962] podstawową wadą przytoczonych badań jest niezachowanie podobieństw eksperymentów, nawet podobieństwa geometrycznego. Trudno więc obliczone współczynniki nazwać współczynnikami skali. Oddają one efekt skali połowicznie, zgodnie potwierdzając obniżenie się wytrzymałości elementów drewnianych przy wzroście ich wymiarów. Tym bardziej trudno na ich podstawie wyjaśnić zjawisko efektu skali. Oprócz tego w rozpatrywanych pracach brak danych o zmienności przytoczonych współczynników, co jest szczególnie ważne przy ustaleniu istotności różnic otrzymanych wyników.

Poprawne badania wpływu efektu skali na wytrzymałość drewna klejonego na zginanie statyczne, z zachowaniem podobieństwa geometrycznego, statycznego, kinetycznego i wilgotnościowo – temperaturowego przeprowadził Sobolev [1975]. Do badań przyjęto cztery serie po 30 próbek, o wymiarach 20x20x300 mm, 30x30x450 mm, 60x66x900 mm, 120x120x1800 mm. Elementy klejone zawierały wady dopuszczalne według norm konstrukcyjnych.

Pomiędzy dwoma naporami wytwarzały się warunki zginania czystego. Prędkość obciążania [kN/min] przyjęto z obliczeń spełniających spełnienie warunku podobieństwa kinetycznego. Wynosiła ona dla poszczególnych serii odpowiednio:  $7 \pm 1,5$ ,  $16 \pm 3,5$ ,  $63 \pm 13,5$  i  $252 \pm 54$ . Za podstawę przyjęto prędkość obciążenia próbek najmniejszych, pierwszej serii. Wszystkie próbki zostały uprzednio przebadane w obszarze odkształceń sprężystych w celu określenia modułu sprężystości przy zginaniu.

Ze wzrostem wymiarów próbek wytrzymałość na zginanie monotonicznie zmniejszyła się od wartości średniej 74,1 MPa dla pierwszej serii do 41,4 MPa dla ostatniej; a więc o 44%. Zmienność wartości wytrzymałości zawarta była w przedziale  $\langle 14,4; 22,6\% \rangle$ , a ich rozkład był zbliżony do normalnego. Analiza dyspersji wykazała istotność wpływu efektu skali na wytrzymałość drewna klejonego na zginanie statyczne, zgodnie z równaniami;

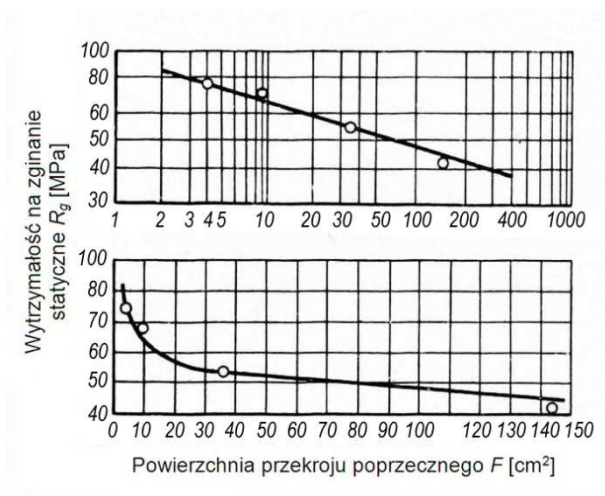
- we współrzędnych logarytmicznych

$$\log R_g = 1,92 - 0,12 \log F, \quad (14)$$

- w postaci zwykłej

$$R_g = \frac{96,40}{F^{0,12}}. \quad (15)$$

Wykresy obu równań przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Wpływ efektu skali na wytrzymałość drewna klejonego na zginanie statyczne [Sobolev 1975]

## 2.6.2. Wpływ efektu skali na wytrzymałość w próbie ściskania drewna

Badania porównawcze wytrzymałości na **ściskanie wzdłuż włókien** w wielu przypadkach także wykazały obniżenie wytrzymałości przy zwiększeniu wymiarów próbki. Z badań Gubienki [1957] wynika, że przy zwiększeniu wymiarów próbki z normatywnych 2x2x3 cm do 8x8x12 cm wytrzymałość zmniejszyła się z 60,5 MPa do 48,5 MPa (o 20%). Tą samą tendencję – obniżenie wytrzymałości o 14% zauważono przy ściskaniu drewna klejonego przy wzroście przekroju poprzecznego od 2x2 do 16x16 cm (przy stałej grubości 3 cm). Według Bykowskiego [1950] zmniejszenie się wytrzymałości drewna przy ściskaniu wzdłuż włókien opisać można zależnością od pola przekroju poprzecznego próbki  $F$  [cm<sup>2</sup>], przy stałej wysokości próbki  $h = 3$  cm:

$$R_{CII} = 40,22 - 5,886 \sqrt{1 - \frac{1}{F}} \quad [\text{MPa}]. \quad (16)$$

Doświadczenia przeprowadzono na próbkach „czystych” bez wad. Jednak nawet to nie tłumaczy zaskakująco niskich wartości obniżenia wytrzymałości, w porównaniu z przekrojem o powierzchni  $F_0 = 4$  cm<sup>2</sup> przy przekroju  $F = 64$  cm<sup>2</sup> zmniejszenie wytrzymałości zgodnie ze wzorem wynosi 2,12%, a maksymalna wartość zmniejszenia 2,23%.

Badania wpływu efektu skali na wytrzymałość drewna klejonego świerkowego z zachowaniem podobieństwa geometrycznego, statycznego, kinetycznego i wilgotnościowo – temperaturowego przeprowadził Sobolew [1976]. Duża liczba próbek (32 – 41 dla każdej z pięciu serii) gwarantowała istotność otrzymanych średnich i oszacowanie zmienności wytrzymałości. Przekroje poprzeczne pracujące na ścinanie w poszczególnych seriach wynosiły 20x20x30 mm, 30x30x45 mm, 60x60x90 mm, 90x90x134 mm i 120x120x180 mm.

Badano drewno klejone z elementów grubości 25 mm z uwagi na powszechność stosowania takiego drewna w wielkowymiarowych konstrukcjach budowlanych; ponadto dlatego że gęstość dopuszczalnych wad drewna w klejonkach jest bardziej równomierna, a ich mechaniczne właściwości



są bardzo zbliżone do drewna naturalnego (przy wysokojakościowym sklejanju). Ze wzrostem wymiarów wytrzymałość na ściskanie wyraźnie malała – od  $R_{cII_0} = 50,7$  MPa dla próbek najmniejszych, porównawczych, do  $R_{cII} = 44,1$  MPa – dla próbek największych (a więc o 8,7%). Zmienność wyników zawarta była w przedziale  $\langle 5,5, 9,3\% \rangle$ . Rozkłady wartości wytrzymałości można było przyjąć za normalne. Na podstawie analizy dyspersji na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  stwierdzono korelację pomiędzy wartościami wytrzymałości, a wymiarami próbek. Za niezależną zmienną przyjęto pole przekroju poprzecznego  $F$  [cm<sup>2</sup>] próbki (rys. 19). Zależność wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien  $R_{cII}$  od pola przekroju próbki opisano równaniem regresji analogicznym do równania (3) Weibulla;

– we współrzędnych logarytmicznych

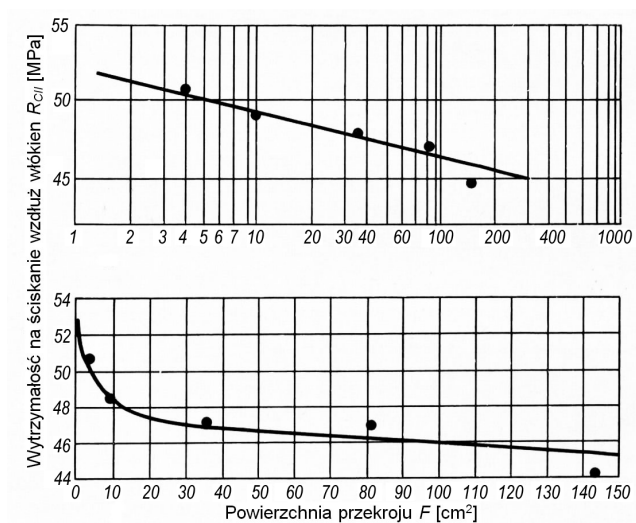
$$\log R_{cII} = 1,710 - 0,0238 \log F, \quad (17)$$

gdzie:  $R_{cII}$  [MPa],  $F$  [cm<sup>2</sup>],

– w postaci zwykłej

$$R_{cII} = \frac{51,3}{F^{0,0238}}. \quad (18)$$

Przy sześciokrotnym wzroście wymiarów próbki (a pola przekroju 36 razy)  $R_{cII}$  zmniejszyła się o 12%.



Rys. 19. Zależność wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien od pola przekroju próbki [Sobolev 1975]

Dla elementów pracujących na ściskanie wzdłuż włókien praktycznie przyjmuje się efekt skali ograniczony do efektu długości. Przyjmując za standardową wytrzymałość deski o długości 3,0 m i przekroju 38x184 mm i średni współczynnik skali  $g = 0,10$  zaproponowano [Madsen 1992] współczynniki skali dla innych długości (tabela 2).

Tabela 2. Wartość współczynników skali dla różnych długości elementów pracujących na ściskanie wzdłuż włókien [Madsen 1992]

Długość [mm]	Wartość współczynnika skali ( $g$ )
1,0	1,12
1,5	1,07
2,0	1,04
2,5	1,02
3,0	1,00
4,0	0,97
5,0	0,95
6,0	0,93
8,0	0,91
10,0	0,89

### 2.6.3. Wpływ efektu skali na ścinanie drewna

Badano też wpływ wymiarów próbek na wytrzymałość drewna sosny i dębu na ścinanie wzdłuż włókien [Artemov 1956]. Przy wzroście powierzchni ścinania od 4 do 16 cm<sup>2</sup> wytrzymałości te obniżyły się odpowiednio o 39 i 26% przy tym i tu podobieństwo eksperymentu nie było zachowane.

Z badań wpływu objętości ścinania wzdłuż włókien na wytrzymałość ścinania przeprowadzonych przez Foschi i Barreta [1976] wynika, że ze wzrostem logarytmu objętości ścinania liniowo maleje logarytm wytrzymałości na ścinanie.

Przeprowadzone na potrzeby maszynowego sortowania tarcicy badania Madsena i Nielsena [1978] wpływu objętości ścinania na wytrzymałość wprawdzie potwierdziły powyższą tendencję, ale rozrzut średnich z poszczególnych serii badań był tak duży, że autorzy nie polecali próby ścinania jako testu do sortowania tarcicy. A zaznaczyć należy, że były to próby niezwykle obszerne. Przebadano 14 serii po 80 próbek każda, przy różnej długości, szerokości i grubości. Standardowa próbka miała wymiary 35x140x560 mm, a objętość ścinania zmieniała się w granicach 300 – 4500 cm<sup>3</sup>.

#### 2.6.4. Wpływ efektu skali na wytrzymałość przy rozciąganiu drewna

Przy rozciąganiu próbek drewna w poprzek włókien według Oszerowicza (za Sobolevem) efektu skali nie zaobserwowano. Niewielki efekt skali przy takim rozciąganiu zaobserwował Pedersen [2003]. Wysokość próbek czystego drewna o gęstości  $\rho = 418 - 479 \text{ kg/m}^3$  zmieniano od 25 do 130 mm. Próbki rozciągano w kierunku promieniowym. Wytrzymałość zmniejszała się od 3,49 MPa dla próbek o wysokości 25 mm do 1,62 MPa dla próbek o wysokości 130 mm. Natomiast wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien tarcicy iglastej ze wzrostem wymiarów się zmniejszała.

W badaniach kanadyjskich, wpływu wymiarów przekroju poprzecznego na rozciąganie wzdłuż włókien, przeprowadzonych na potrzeby maszynowego sortowania tarcicy [Madsen, Nielsen 1978] stwierdzono, że ze wzrostem szerokości przekroju (przy stałej jego grubości 38 mm) wytrzymałość maleje, jednak w nieco mniejszym stopniu niż przy zginaniu (tabela 3).

Tabela 3. Zależność współczynnika skali przy wytrzymałości drewna na rozciąganie wzdłuż włókien w odniesieniu do wysokości przekroju 184 mm [Madsen 1992]

Wymiary przekroju [mm]	38x89	38x140	38x184	38x235
Klasa tarcicy				
Klasa SS (Select Structural)	1,20	1,10	1,00	0,90
Klasa 1 i 2	1,13	1,06	1,00	0,93

Okazało się, że dla najlepszej tarcicy (klasa SS) efekt skali był największy.

Na potrzeby maszynowego wytrzymałościowego sortowania tarcicy i projektowania elementów drewnianych pracujących na rozciąganie Madsen [1992] zaleca przyjąć średnie wartości współczynników efektu długości  $g = 0,20$ , a efektu wysokości przekroju  $g = 0,10$ . W oparciu o te wartości, przyjmując za standardowy element rozciągany w postaci belki o długości 3 m i przekroju 38x184 mm, obliczono współczynniki poprawcze do obliczenia wytrzymałości na rozciąganie przy innych długościach i wysokościach przekroju (tabela 4).

Do projektowania elementów drewnianych pracujących na rozciąganie proponuje się uwzględniać wpływ długości elementów i wysokości przekrojów [Madsen 1992] odniesionych do prętów o grubości 38 mm i wysokości  $h = 184$  mm oraz długości  $L_0 = 3000$  mm (Kanada), ewentualnie  $L_0 = 2700$  mm (Europa). Proponuje się przyjęcie parametru efektu długości  $g = 0,20$  i parametru efektu wysokości (szerokości) przekroju  $g = 0,10$  i obliczanie wytrzymałości projektowanych elementów o długości  $L$  i wysokości przekroju  $h$  według wzorów na:

- efekt długości

$$R_{rL} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^{0,2} R_{rL_0}, \quad (19)$$

- efekt wysokości przekroju

$$R_{rh} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{0,1} R_{rh_0}, \quad (20)$$

gdzie:

$R_{rL}$ ,  $R_{rh}$  – wytrzymałość na rozciąganie projektowanego elementu,

$R_{rL_0}$ ,  $R_{rh_0}$  – wytrzymałość na rozciąganie elementu standardowego (o  $L_0$  i  $h_0$ ).

Według powyższych wzorów obliczono wartości współczynników przeliczeniowych wytrzymałości na rozciąganie w zależności od długości i przekroju elementów projektowanych (tabela 4).

Tabela 4. Wartości współczynników przeliczeniowych wytrzymałości na rozciąganie w zależności od przekrojów elementów projektowanych [Madsen 1992]

Długość [mm]	38x89	38x140	38x184	38x235	38x286
1,0	1,35	1,29	1,25	1,23	1,20
1,5	1,24	1,18	1,15	1,13	1,10
2,0	1,17	1,11	1,08	1,06	1,04
2,5	1,12	1,07	1,04	1,02	1,00
3,0	1,08	1,03	1,00	0,98	0,96
4,0	1,02	0,97	0,94	0,92	0,90
5,0	0,97	0,93	0,90	0,88	0,86
6,0	0,94	0,90	0,87	0,85	0,84
8,0	0,88	0,84	0,82	0,80	0,79
10,0	0,85	0,81	0,79	0,77	0,76
15,0	0,78	0,74	0,72	0,71	0,69
30,0	0,68	0,65	0,63	0,62	0,60

### 2.6.5. Wpływ efektu skali na stałe sprężyste drewna

Najbardziej skąpe dane w literaturze technicznej istnieją odnośnie wpływu efektu skali na stałe sprężyste drewna, co wynika prawdopodobnie ze złożoności eksperymentów i trudności w interpretacji ich wyników. Według Sobolewa [1979] w obciążanym drewnie jako materiale sprężysto–lepko–plastycznym zachodzi złożony proces rozkładu naprężeń, których wartości zależą od niejednorodności budowy drewna, rodzaju wad i objętości próbek.

Badania wpływu efektu skali na moduł sprężystości przy zginaniu statycznym belek z drewna klejonego przeprowadził Sobolew [1975]. Średnie wartości modułu nieznacznie malały (około 12 %) przy sześciokrotnym zwiększeniu próbek, przy tym istotnie zmniejszał się współczynnik zmienności modułu przy zwiększaniu wymiarów próbek – z  $v = 15,3\%$  do  $v = 7,2\%$

(~ 2,1 razy). Rozkład wartości modułów zbliżony był do normalnego. Analiza dyspersyjna wykazała, że główną przyczyną zmian modułu był efekt skali.

Zależność modułu sprężystości  $E$  [GPa] od pola przekroju  $F$  [cm<sup>2</sup>] próbki była następująca:

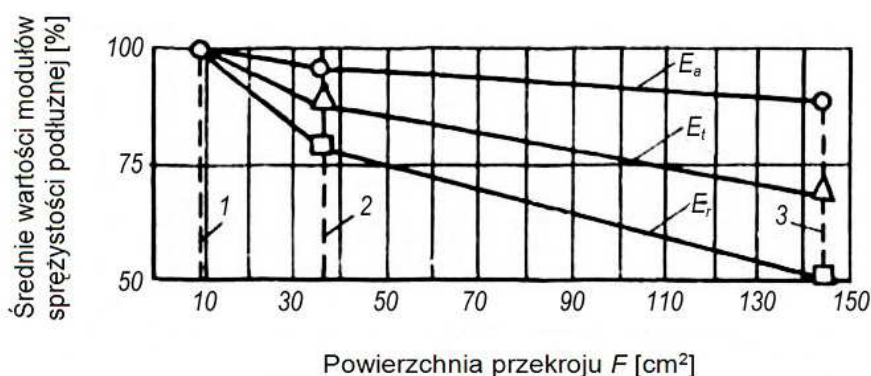
$$\log E = 1,051 - 0,0336 \log F, \quad (21)$$

czyli:

$$E = \frac{11,25}{F^{0,0336}}. \quad (22)$$

Podobnie jak wytrzymałość również stałe sprężyste nie są „stałe” lecz zależą od wilgotności i temperatury drewna, gatunku, warunków wzrostu itp. Do tych czynników zaliczyć trzeba wpływ kształtu i wymiarów próbek na wartości stałych sprężystych. Badania zależności stałych sprężystych – modułów sprężystości podłużnej ( $E$ ), modułów odkształcenia postaciowego (modułów Kirchoffa  $G$ ) i liczb Poissona od efektu skali przy ściskaniu drewna sosny przeprowadził Sobolew [1956, 1958, 1959]. Badano trzy serie na ściskanie wzdłuż włókien ( $a$ ) po 20 próbek o wymiarach 30x30x90, 60x60x180 i 120x120x360 mm i po trzy serie próbek po 25 sztuk o wymiarach 30x30x60, 60x60x120 i 120x120x240 mm – do badań na ściskanie w poprzek włókien w kierunkach: promieniowym ( $r$ ), stycznym ( $t$ ) i pod kątem 45° do kierunku promieniowego. Wilgotność próbek wynosiła 8 ÷ 10 %.

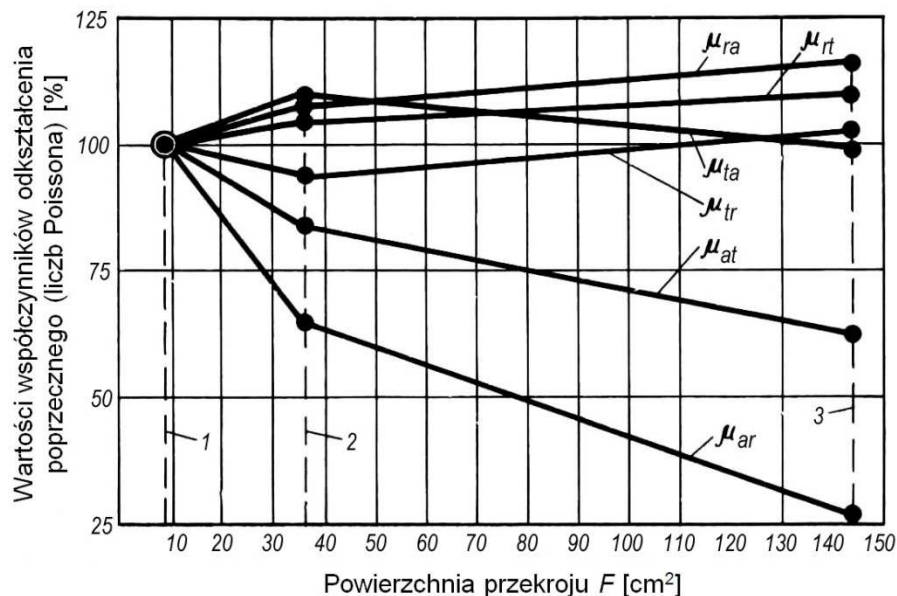
Średnie wartości modułów sprężystości podłużnej we wszystkich kierunkach zmniejszały się ze wzrostem wymiarów próbek.



Rys. 20. Zmiana średnich wartości modułów sprężystości podłużnej wraz ze wzrostem wymiarów próbek [Sobolew 1975]

W największym stopniu zmniejszał się moduł sprężystości przy ściskaniu poprzecznym w kierunku promieniowym  $E_r$  (do 49 % w przypadku próbek największych, w porównaniu z najmniejszymi). Przy tym samym wzroście próbek moduł  $E_t$  (przy ściskaniu poprzecznym w kierunku stycznym) zmniejszył się o 32 %, a moduł sprężystości przy ściskaniu wzdłuż włókien  $E_a$  – tylko o 8 %.

Na rys. 21, przedstawiono zmiany wartości współczynników odkształcenia poprzecznego (liczb Poissona) spowodowane efektem skali, odniesione do wartości dla próbek najmniejszych. Pierwszy indeks liczb Poissona oznacza kierunek mierzonego odkształcenia poprzecznego, a drugi – kierunek ściskania. Liczby  $\mu_{ra}$  i  $\mu_{rt}$  ze wzrostem wymiarów próbek zwiększały się odpowiednio o 15 i 9 %, co tłumaczy się zmniejszeniem się wpływu promieni rdzeniowych ze wzrostem wymiarów próbek. Liczby  $\mu_{ta}$  i  $\mu_{tr}$  ze wzrostem wymiarów próbek nie zmniejszały się. Wartości  $\mu_{ar}$  i  $\mu_{at}$  wyraźnie zmniejszały się – odpowiednio o 68 i 30 %, przy szesnastokrotnym wzroście pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki.



Rys. 21. Zmiany wartości współczynników odkształcenia poprzecznego spowodowane efektem skali [Sobolev 1975]

Moduły odkształcenia postaciowego  $G_{ra}$ ,  $G_{ta}$  i  $G_{rt}$  zmniejszają się ze wzrostem wymiarów próbki; przy szesnastokrotnym wzroście pola powierzchni przekroju próbki – odpowiednio o 43, 30 i 21 %.

Zależność modułu sprężystości  $E_a$  [GPa] przy ściskaniu wzdłuż włókien była następująca:

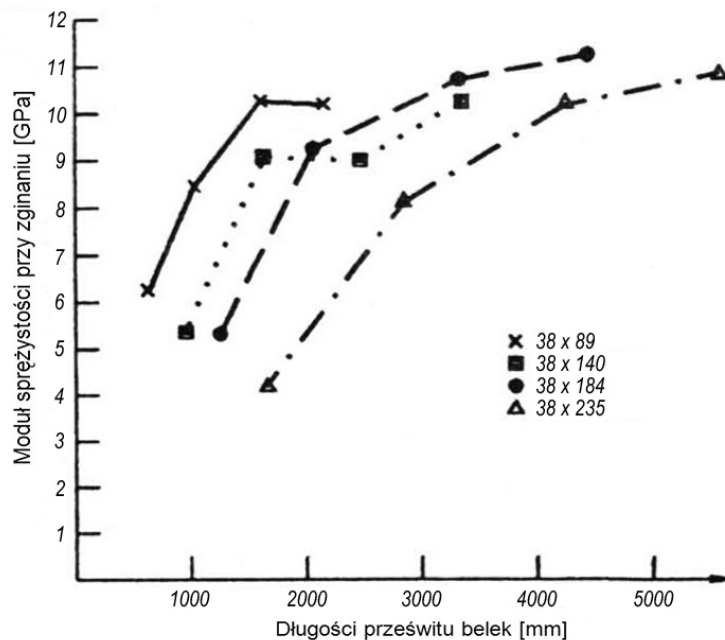
$$\log E_a = 1,1166 - 0,0219 \log F, \quad (23)$$

czyli:

$$E_a = 13,08F^{-0,0219}. \quad (24)$$

W Kanadzie [Madsen 1992] przy okazji badań efektu skali na wytrzymałość na zginanie zbadano wpływ długości prześwitu belek na moduł sprężystości przy zginaniu. Próbki miały jednakową grubość 38 mm i cztery wysokości  $h = 89, 140, 184$  i  $235$  mm. We wszystkich seriach ze wzrostem długości prześwitu istotnie wzrastał moduł sprężystości  $E$  (rys. 22).

Przy wysokości przekroju 89 mm i wzroście prześwitu od  $s = 700$  do 2000 mm moduł wzrastał średnio o 65%, przy wysokości 140 mm i wzroście prześwitu od 1000 do 3400 mm moduł wzrastał średnio o 96%. Analogicznie przy wysokości 184 mm i wzroście długości od 1300 do 4500 mm,  $E$  wzrastał o 119%, a przy  $h = 235$  mm i wzroście  $s$  od 1600 do 5600 mm  $E$  wzrastał o 172%.



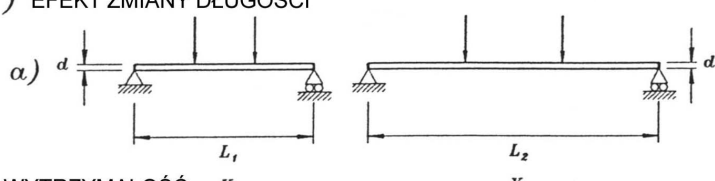
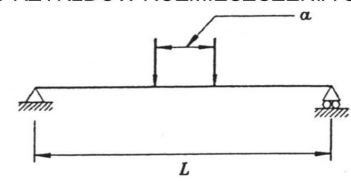
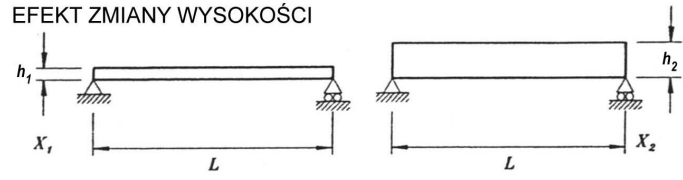
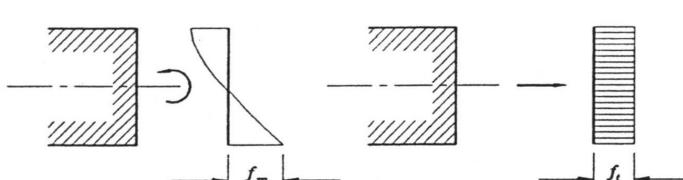
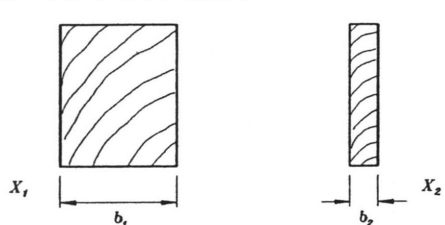
Rys. 22. Wpływ długości prześwitu belek na moduł sprężystości przy zginaniu [Madsen 1992]



## 2.6.6. Czynniki efektu skali

Oprócz współczynnika efektu skali wpływ wymiarów próbki na wytrzymałość i stałe sprężyste drewna stosuje się tzw. czynniki efektu skali (tabela 5).

Tabela 5. Sprowadzanie efektu skali do efektu wymiarów próbki lub rodzaju naprężeń i obliczanie parametru skali [Madsen 1992]

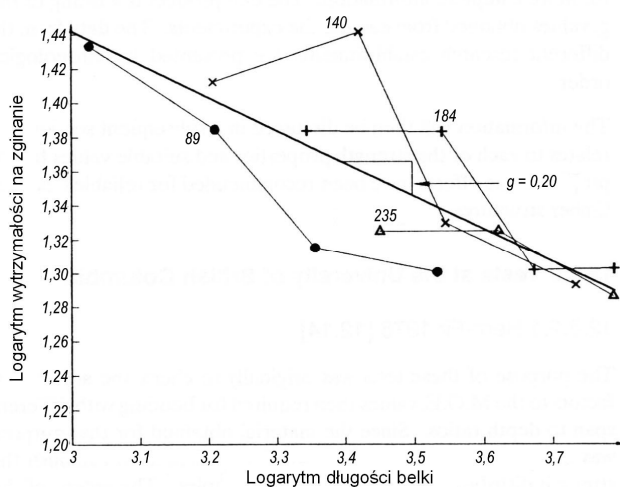
		Wzór
<p>1) EFEKT ZMIANY DŁUGOŚCI</p> <p>α) </p> <p>WYTRZYMAŁOŚĆ <math>x_1</math> <math>x_2</math></p> <p>KILKA PRZYKŁDÓW ROZMIESZCZENIA OBCIĄŻENIA</p> <p>b) </p>		<p><math>g</math> = parametr wpływu skali</p> $K = \frac{X_1}{X_2} = \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^g$ <p>EFEKTYWNA DŁUGOŚĆ</p> $L_e = \frac{g_1 + \frac{\alpha}{L}}{g_1 + 1}$
<p>2) EFEKT ZMIANY WYSOKOŚCI</p> <p></p> <p><math>x_1</math> <math>x_2</math></p>		$K = \frac{X_1}{X_2} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{g_2}$
<p>3) EFEKT ZMIANY ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ</p> <p></p> <p>MOMENT GNĄCY <math>f_m</math> SIŁA WZDŁUŻNA <math>f_t</math></p>		$f_m = 2 \left( 1 + \frac{1}{g_3} \right)^{g_3} f_t$
<p>4) EFEKT ZMIANY SZEROKOŚCI</p> <p></p> <p><math>x_1</math> <math>x_2</math></p> <p><math>b_1</math> <math>b_2</math></p>		$K = \frac{X_1}{X_2} = \left( \frac{b_2}{b_1} \right)^{g_4}$

Czynnikiem (parametrem) efektu skali nazywa się stosunek wytrzymałości próbki przy wymiarze dwa razy większym od wymiarów próbki mniejszej do wytrzymałości tej próbki mniejszej. Czynnikiem (parametrem) efektu skali określa się względem wymiarów przekroju poprzecznego (szerokości, wysokości), długości próbki, rozmieszczenia obciążenia i zmiany rozkładu naprężeń. Stąd też efekt skali sprowadza się do **efektu zmiany długości** (Length Effect), **efektu zmiany wysokości** (Depth Effect), **efektu zmiany rozkładu naprężeń**.

### 2.6.7. Określanie wpływu wymiarów i stanu naprężenia tarcicy na jej wytrzymałość

Badania wpływu efektu skali na wytrzymałość na zginanie na potrzeby maszynowego sortowania tarcicy z drewna choiny kanadyjskiej przeprowadzono w Kanadzie [Madsen, Nielsen 1976]. Belki były o stałej grubości 38 mm i o różnej wysokości  $h = 89, 140, 184$  i 235 mm i różnym stosunku długości prześwitu  $L$  do wysokości przekroju  $h$ ,  $\frac{L}{h} \cong 12, 19, 25$  i 38 tzn. długość belek zmieniała się. Każda seria składała się z około 100 belek; łącznie było ich 1418. Zginano dwoma naporami odległymi o  $L/3$ .

Ze zwiększeniem się długości wytrzymałość na zginanie malała, zależność logarytmu wytrzymałości na zginanie od logarytmu długości belki pokazano na rys. 23.



Rys. 23. Zależność logarytmu wytrzymałości na zginanie od logarytmu długości belki [Madsen 1992]

Średni parametr efektu długości (length effect) wynosi  $g_1 = 0,20$ . Obliczano go jako współczynnik nachylenia prostej  $\log R_g / \log L$  z zależności:

$$\frac{R_{g_1}}{R_{g_2}} = \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^{g_1} \quad (25)$$

Zależność logarytmu wytrzymałości na zginanie od logarytmu wysokości przekroju belki była niejednoznaczna. Dla małych długości belek ze wzrostem wysokości wytrzymałość malała, a dla dużych długości belek ze wzrostem wysokości wytrzymałość na zginanie również wzrastała. W efekcie średni efekt wysokości belek (depth effect) liczony z zależności:

$$\frac{R_{g_1}}{R_{g_2}} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{g_2} \quad (26)$$

wynosił  $g_2 = -0,03$ . Praktycznie więc średni efekt skali tylko przy wzroście wysokości nie zaznaczył się.

Badano też wpływ efektu skali na moduł sprężystości przy zginaniu. Zarówno przy wzroście długości belki przy stałej wysokości jak przy wzroście stosunku długości do wysokości przekroju belki moduł sprężystości wyraźnie wzrastał.

Dla potrzeb maszynowego sortowania tarcicy przeprowadzono też badania zginania w seriach przy stałym stosunku długości prześwitu do wysokości przekroju [Madsen, Nielsen 1978]. Pomiędzy seriami stosunek ten zmieniał się od 17 do 1. Średnia wartość współczynnika skali  $g = 0,19$ .

Badaniem wpływu efektu skali na wytrzymałość na zginanie, rozciąganie i ściskanie poświęcona była praca doktorska Buchanana [1984] (za Madsenem [1992]). Badano belki różnej długości i stałych dwóch przekrojach 38x89 mm i 38x140 mm. Stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości na zginanie ( $g = 0,10$ ). Przy tym z pomiaru naprężeń wynikło, że wytrzymałość na zginanie była znacznie większa od wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie, a rozrzut wytrzymałości na rozciąganie był znacznie większy niż na ściskanie (tabela 6).

Tabela 6. Wyniki badań przedstawiające zakresy wartości wytrzymałości mechanicznej drewna na rozciąganie, ściskanie i zginanie [Madsen 1992]

Przekrój belki	Wytrzymałość [MPa] na:		
	rozciąganie	ściskanie	zginanie
38x89 mm	14 – 48	23 – 38	27 – 78
38x140 mm	12 – 48	20 – 32	22 – 65

Na potrzeby maszynowego sortowania tarcicy badano też [Madsen, Buchanan 1986] wpływ sposobu obciążenia (jedną i dwoma naporami) i długości belki przy stałym przekroju 38x140 mm, dwóch długościach 1,54 i 3,08 m oraz różnych podparciach – swobodnie podpartych (przegubowo) i utwierdzonych w obu końcach. Czynniki efektu skali  $g_2$  we wszystkich przypadkach belek utwierdzonych w obu końcach były znacznie mniejsze (o 2/3) niż współczynniki skali  $g_1$  przy belkach podpartych swobodnie:  $g_1 = 0,27 - 0,30$ ,  $g_2 = 0,08 - 0,11$ .

W projektowaniu belek drewnianych, zdaniem badaczy [Johnson 1953, Madsen, Buchanan 1986, Madsen 1992] należy uwzględnić dwa aspekty efektu skali. Jeden to zwykły efekt długości statystycznie związany ze wzrostem długości prześwitu belki, a drugi związany ze sposobem obciążenia belki (i w efekcie sposobem rozłożenia momentu gnącego wzdłuż belki). Najbardziej pospolite założenie stosowane przy projektowaniu to przyjęcie jednostajnego obciążenia stałego (U.D.L. = uniformly distributed load) belki podpartej swobodnie (przegubowo). W eksperymentalnym badaniu wytrzymałości drewna na zginanie najczęściej przyjmuje się obciążenie trójpunktowe (the third point loading) – z dwoma symetrycznie położonymi naporami odległymi o 1/3 prześwitu. W tabeli 7 przytoczono współczynniki do przeliczania różnego rodzaju podparcia i obciążenia belek na obciążenie przyjęte za standardowe (bazowe) :

- 1) parami sił na końcach prześwitu (a więc stałym momentem gnącym),
- 2) trójpunktowo (dwoma naporami),
- 3) stałym jednostajnym obciążeniem (U.D.L.).

Tabela 7. Wartości współczynników do przeliczania różnego rodzaju podparcia i obciążenia belek na obciążenie przyjęte za standardowe [Madsen 1992]

Schemat podparcia i obciążenia belki	Współczynniki przeliczeniowe odniesione do obciążenia stałym momentem gnącym	Współczynniki przeliczeniowe odniesione do trójpunktowego obciążenia (dwie naporami)	Współczynniki przeliczeniowe odniesione do stałego jednostajnego obciążenia
	1,00	0,87	0,84
	1,15	1,00	0,95
	1,20	1,04	1,00
	1,40	1,22	1,15
	1,40	1,22	1,15
	1,55	1,35	1,30
	1,65	1,43	1,40

Tabela 8. Wartości współczynników do obliczania wytrzymałości na zginanie uwzględniające zmianę długości prześwitu jak i sposobu obciążenia belki odniesione do belki standardowej przy  $g = 0$  [Madsen 1992]

Długość [m]					
1,0	1,44	1,30	1,25	1,20	1,06
1,5	1,32	1,20	1,15	1,10	0,98
2,0	1,24	1,12	1,08	1,04	0,92
2,5	1,20	1,08	1,04	1,00	0,88
3,0	1,15	1,04	1,00	0,96	0,85
4,0	1,09	0,99	0,95	0,91	0,81
5,0	1,04	0,94	0,90	0,86	0,77
6,0	1,00	0,91	0,87	0,84	0,74
8,0	0,94	0,85	0,82	0,79	0,70
10,0	0,91	0,82	0,79	0,76	0,67

Współczynniki do obliczania wytrzymałości na zginanie uwzględniają zarówno zmianę długości prześwitu jak i sposobu obciążenia belki odniesione do wytrzymałości belki standardowej (o długości  $L_0 = 3,0$  m i obciążeniu jednostajnym U.D.L.), przy założeniu parametru efektu zmiany długości  $g = 0$  (tabela 8). Przy tym wpływ efektu zmiany długości liczono następująco:

$$R_{gL} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^{0,2} R_{gL_0}, \quad (27)$$

gdzie:

$L$  – długość danej belki,

$R_{gL_0}$  – wytrzymałość na zginanie belki przyjętej za porównawczą,

$R_{gL}$  – wytrzymałość na zginanie danej belki.

Wyniki badań Madsena [1990] nad wpływem długości próbek na wytrzymałość na zginanie, rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien tarcicy świerkowej o stałym przekroju 38x89 mm potwierdziły wpływ efektu długości na wytrzymałości. Średnie czynniki skali były równe: przy zginaniu  $g = 0,20$ , przy rozciąganiu  $g = 0,22$ , a przy ścisaniu  $g = 0,1$ . Potwierdził się stwierdzony w innych badaniach wpływ skali na ściskanie. Długości próbek przy rozciąganiu zawarte były w granicach 457 – 3970 mm, przy ścisaniu 610 – 4889 mm, a przy zginaniu 780 – 4776 mm.

Badano też efekt skali na wytrzymałość tarcicy z choiny kanadyjskiej [Madsen 1992]. Do badań użyto deski grubości 38 mm i szerokościach 89, 140, 184 i 235 mm. Zginanie było badane przy czterech różnych stosunkach długości prześwitu  $L$  do wysokości przekroju  $h$ , przy tym wysokość przekroju równa była ich szerokości. Badano serie próbek o  $L/h = 7, 12, 16, 24$  (przy zginaniu jedną, środkową naporą) i  $L/h = 18$  (przy zginaniu przy dwóch naporach). Tak więc długość prześwitu belek zawarta była w przedziale <623; 5640 mm>. Rozciąganie wzdłuż włókien badano na deskach o tych samych przekrojach i trzech długościach w każdej serii, zmieniających się od 762 do 5181 mm. Również na tych belkach o tych samych przekrojach badano ściskanie wzdłuż włókien, każde o długościach 762 i 213,4 mm.

Łącznie przebadano 40 serii próbek, a w każdej serii około 130 próbek, a więc w sumie około 5200 próbek.

Przy zginaniu ze wzrostem długości belek wytrzymałości wyraźnie spadają; we wszystkich grupach wysokości przekroju czynniki efektu długości (length effect) miały wysoką wartość zawartą w przedziale  $\langle 0,27; 0,70 \rangle$  i średnio dla wszystkich grup wynosiły 0,31. Zależności logarytmu wytrzymałości na zginanie od logarytmu długości prześwitu belek były prostoliniowe, przy współczynnikach korelacyjnych  $\langle 0,92; 0,99 \rangle$ . Średnia wartość wytrzymałości na zginanie wynosiła 34,7 MPa.

Przy rozciąganiu we wszystkich grupach średnie wartości czynników efektu długości  $g$  były dodatnie; ze wzrostem długości wytrzymałość na rozciąganie malała, ale nie zauważono jednolitej tendencji zmiany współczynników  $g$  ze wzrostem wysokości przekroju. Zależności  $\log R_{rII}$  ( $\log L$ ) była liniowa, o współczynniku korelacji  $\langle 0,91; 0,99 \rangle$ , a średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien wynosiła 18,6 MPa.

Przy ściskaniu wzdłuż włókien czynnik efektu długości był znacznie mniejszy niż przy zginaniu i rozciąganiu i miał tendencję do malenia ze wzrostem wysokości przekroju (tabela 9).

Tabela 9. Wpływ efektu wzrostu długości próbki na wytrzymałość tarcicy z choiny kanadyjskiej [Madsen 1992]

Wymiary przekroju próbek [mm]	Czynniki efektu skali (tu: zmiany długości próbki) na wytrzymałość na:		
	Zginanie	rozciąganie	Ściskanie
38x89	0,29	0,08	0,14
38x140	0,27	0,34	0,13
38x184	0,70	0,39	0,05
38x235	0,52	0,19	0,05
Średnio	0,31	0,26	0,09
Średnia wytrzymałość [MPa]	34,7	18,6	26,0

Zależność wytrzymałości od wysokości przekroju była niejednoznaczna. Wytrzymałość na zginanie ze wzrostem wysokości przekroju nieznacznie

wzrastała ( $g = -0,08$ ), wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien równie nieznacznie malała ( $g = 0,10$ ), a wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien wzrastała ( $g = -0,15$ ).

W Kanadzie badano też efekt skali na czystym zginanym drewnie iglastym (sośnie, świerku i jodle) [Madsen, Momoi 1991]. Próbki miały wymiary od 25x25x175 mm do 75x75x1575 mm. Próbki o wysokości 25 mm wykonano w trzech szerokościach – 25, 50 i 75 mm oraz w trzech długościach – 175, 350 i 525 mm. Próbki o wysokości 50 mm również w trzech szerokościach – 25, 50 i 75 mm oraz trzech długościach – 350, 750 i 993 mm. Próbki o wysokościach 75 mm miały szerokość 25, 50 i 75 mm, a długość 525, 993 i 1575 mm. Liczba próbek w każdej serii wynosiła 100. Zginania dokonywano jedną naporą umieszczoną po środku prześwitu. Nie stwierdzono efektu skali przy zmianie wysokości i szerokości przekroju. Na przykład średnia wytrzymałość na zginanie przy szerokości przekroju 25 mm wynosiła 70,0 MPa, przy szerokości 50 mm – 69,5 MPa, a przy szerokości 75 mm – 69,7 MPa we wszystkich seriach przy zmienności nie przekraczającej 13%. Stwierdzono natomiast wpływ długości próbek na wytrzymałość na zginanie; ze wzrostem długości od 175 do 1575 mm średnia wytrzymałość zmieniała się odpowiednio od 87,4 do 60,8 MPa.

Na podstawie badań wytrzymałości tarcicy przeprowadzonych w latach 1985 – 87 w USA, stwierdzono wystąpienie czynnika efektu skali przy rozciąganiu, którego średnia wartość dla tarcicy klasy SS wynosiła  $g = 0,18$ , a tarcicy klasy niższej nr 2 –  $g = 0,10$  [Lam 1987, 1990].



## **2.7. Wpływ wybranych wad na wytrzymałość drewna**

W praktyce inżynierskiej wadami drewna zwykło się nazywać wszelkie nieprawidłowości w budowie drewna wynikające z choroby drzew, uszkodzeń mechanicznych lub biologicznych oraz cech naturalnych, które ograniczają zakres wykorzystania drewna lub czynią go zupełnie nieprzydatnym. Są to więc głównie niejednorodności pierwszego rodzaju (podrozdział 2.1).

Najogólniejszy podział wad drewna, podany przez Krzysika [1978], jest następujący:

- wady kształtu pnia (zbieżystość, krzywizna, rozwidlenia, spłaszczenie, zgrubienia, rak, napływy korzeniowe),
- wady anatomicznej budowy drewna (sękatość, nieregularna słoistość i przebieg włókien, mimośrodowość rdzenia, wielordzenność, drewno reakcyjne, nagromadzenia wydzielin, zakorki, zawoje),
- wady spowodowane przez czynniki zewnętrzne i klimatyczne (zranienia, martwice, zabitki, pęknięcia, zabarwienia chemiczne),
- wady wywołane przez grzyby (sinizna, zgnilizna, zaparzenia),
- wady wywołane przez zwierzęta (chodniki owadzie, dziuple, spały).

Zbiór przepisów określających dopuszczalność wad i uzależniających klasę jakości drewna od liczby, wymiarów, kształtu i rodzaju występujących w nim wad podany jest w normach europejskich, państwowych i branżowych [PN-79/D-01011, PN-79/D-01012, PN-82/D-94021]. Szereg tych wad wpływa głównie na estetykę wyrobów z drewna (np. zabarwienia, chodniki owadzie).

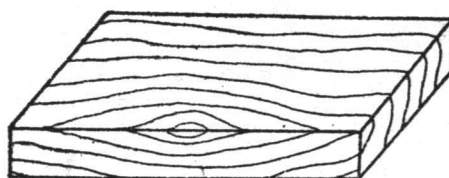
Z uwagi na cel pracy ważny jest jednak wpływ wad na wytrzymałość drewna, a jest on zróżnicowany.

### **2.7.1. Nienormalne zabarwienia drewna**

Zabarwienia te spowodowane są przez grzyby barwiące drewno lub niszczące drewno (w pierwszym stadium ich rozwoju) albo przez czynniki o charakterze nie pasożytniczym. W tym pierwszym stadium zmian barwy drewno nie różni się właściwościami mechanicznymi od drewna zdrowego; jest nieco bardziej niejednorodne [Wanin 1953].

**Zawiły układ włókien** (nieregularny lub splątany ich przebieg) jest wadą względną; zmniejsza wytrzymałość drewna na zginanie i moduł sprężystości – natomiast zwiększa twardość oraz wytrzymałość na ściskanie, łupanie, ścinanie. Obrzęki i napływy korzeniowe mają zawsze drewno o zawiłym układzie włókien.

**Zawój** (lokalne skrzywienie słoików rocznych) wywołany jest przez sęki lub zakorki. Zawój zmniejsza wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien, na zginanie statyczne i udarność. Obniżenie wytrzymałości spowodowane zawojem przy ścisaniu wzdłuż włókien dochodziło do 23%, przy zginaniu statycznym – 33%, przy udarności – do 18%.



Rys. 24. Zawój [Wanin 1953]

### 2.7.2. Uszkodzenia spowodowane przez owady

Zgodnie z normą rozróżniamy powierzchniowe, płytkie i głębokie chodniki owadzie, a ze względu na średnicę – chodniki małe (o średnicy do 3 mm) i duże (o średnicy powyżej 3 mm). Powierzchniowe chodniki spowodowane są przez korniki lub szkodniki występujące na powierzchni pnia i zagłębione są na głębokość 1 ÷ 2 mm. Chodniki płytkie zagłębione na 2 ÷ 50 mm są spowodowane przez niektóre inne chrząszcze. Głębokie chodniki stanowią ślady żerowania owadów na głębokości powyżej 5 cm, często przechodzą przez całą grubość pnia. Wywoływane są one przeważnie przez owady z rodziny kózkowatych. Powierzchniowe chodniki nie zmniejszają technicznych właściwości drewna; natomiast głębokie znacznie zmniejszają wytrzymałość drewna, a nawet dyskwalifikują drewno jako surowiec przemysłowy.

### 2.7.3. Pozostałe wady znaczące

Norma PN-EN 518:2000 podająca wymagania stawiane normom krajowym dotyczących sortowania wytrzymałościowego tarcicy metodą wizualną za główne wady drewna zmniejszające wytrzymałość przyjmuje: sęki, skręt włókien, niską gęstość i pęknięcia. Norma brytyjska BS 4978:1996 wizualne sortowanie tarcicy opiera na wskaźnikach sękatości.

Tendencję wzrostu wytrzymałości drewna gatunków amerykańskich ze wzrostem gęstości  $D$  drewna [Bodig, Jayne 1982] wyrazić można ogólną zależnością:

$$y=aD^b \Leftrightarrow \log y = \log a + b \log D, \quad (28)$$

gdzie parametry  $a$  i  $b$  są różne dla poszczególnych właściwości mechanicznych.

Przy wilgotności drewna równej 12% wartości parametrów  $a$  i  $b$  przeliczone na [MPa] podane są w tabeli 10.

Tabela 10. Wartości stałych  $a$  i  $b$  do określania związku (28) pomiędzy właściwościami mechanicznymi drewna, a jego gęstością [Bodig, Jayne 1982]

Rodzaj pracy wytrzymałościowej i właściwości drewna	$a$	$b$
Zginanie statyczne:		
- granica proporcjonalności [MPa],	115,17	1,25
- moduł sprężystości [MPa]	19300	1,00
Ściskanie wzdłuż włókien:		
- granica proporcjonalności,	60,345	1,00
- wytrzymałość,	84,138	1,00
- moduł sprężystości	23310	1,00
Ściskanie prostopadle do włókien (w poprzek włókien):		
- granica proporcjonalności	31,931	2,25

Z badań przeprowadzonych na potrzeby wytrzymałościowego sortowania tarcicy metodą maszynową [Glos 1982] wynika, że największy wpływ na wytrzymałość drewna ma jego gęstość i sękatość (tabela 11).

Łączny wpływ gęstości drewna i jego sękatości na wytrzymałość opisać można współczynnikami korelacji równymi  $0,7 \div 0,8$ . Taki sam współczynnik korelacji występuje pomiędzy modułem sprężystości przy zginaniu, a wytrzymałością drewna.

Publikacji na temat wpływu wad na wytrzymałość drewna, zwłaszcza źródłowych, jest niewiele. Różnorodna też była metodyka badań. W podanej niżej analizie wpływu wad na wytrzymałość drewna pominięto te wady, które zwykle dyskwalifikują drewno jako użytkowe. Są to: zgnilizna, napływy korzeniowe, rak (zagłębiona rana otoczona napływem), martwica, zakorki, zawoje, zabitki, duże pęknięcia, dziuple, spały. Elementy konstrukcji wykonuje się z części pnia pozbawionych tych wad.

Tabela 11. Współczynniki korelacji między wybranymi cechami drewna i jego wytrzymałością w odniesieniu do desek i bali z drewna europejskich gatunków iglastych [Glos 1982]

Cecha drewna	Korelacja z wytrzymałością		
	na zginanie	na rozciąganie	na ścinanie
Gęstość	0,5	0,5	0,6
Szerokość przyrostów rocznych	0,4	0,5	0,5
Sękatość	0,5	0,6	0,4
Odchylenie włókien	0,2	0,2	0,1
Moduł sprężystości przy zginaniu	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$
Gęstość + sękatość	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$
Moduł sprężystości + gęstość	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$	$0,7 \div 0,8$
Moduł sprężystości + sękatość	$>0,8$	$>0,8$	0,8

Bardzo duży wpływ wad (głównie sękatości, skrętu włókien i małej gęstości) znajduje odzwierciedlenie w podziale tarcicy na klasy wytrzymałości. Północnoamerykańskie standardy według Madsena 1992 wyróżniają np. cztery klasy tarcicy: klasę SS (Select Structural Grade), klasę 1, 2 i 3. W tabeli 8 podano wytrzymałość na zginanie tarcicy z daglezji, choiny kanadyjskiej oraz świerkowo – sosnowo – jodłowej (S–P–F). Małe „czyste” próbki z daglezji były

o 52% wytrzymalsze niż próbki z iglastych (S–P–F). Ale tarcica z daglezi o dopuszczalnych normą wadach tylko w klasie SS jest nieznacznie wytrzymalsza od iglastej, a w niższych klasach słabsza od iglastych. Przy tym oczekiwana wytrzymałość na zginanie tarcicy z daglezi klasy SS jest dwukrotnie większa od wytrzymałości tarcicy trzeciej klasy.

#### **2.7.4. Wpływ zgnilizny na wytrzymałość drewna**

Do ważniejszych wad surowca drzewnego zalicza się zgnilizny powstałe w wyniku rozkładu drewna przez grzyby. Rozróżnia się zgniliznę korzeniową, strzałkową i gałęziową, zgniliznę bielu i twardego. Istnieje szereg podziałów zgnilizny ze względu na zmiany chemicznego składu drewna, zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych i zabarwienie. Biorąc pod uwagę barwę i strukturę drewna uległego zgniliznie można wyróżnić trzy zasadnicze typy zgnilizn:

- zgnilizna brunatna (destrukcyjna),
- zgnilizna biała (jednolita),
- zgnilizna pstra (korozyjna)

Zabarwienie i struktura gnijącego drewna zależą od gatunku grzyba, gatunku drewna i stadium zgnilizny. W każdym przypadku zgnilizny porażone drewno zmieniało swoją objętość i ciężar właściwy (gęstość).

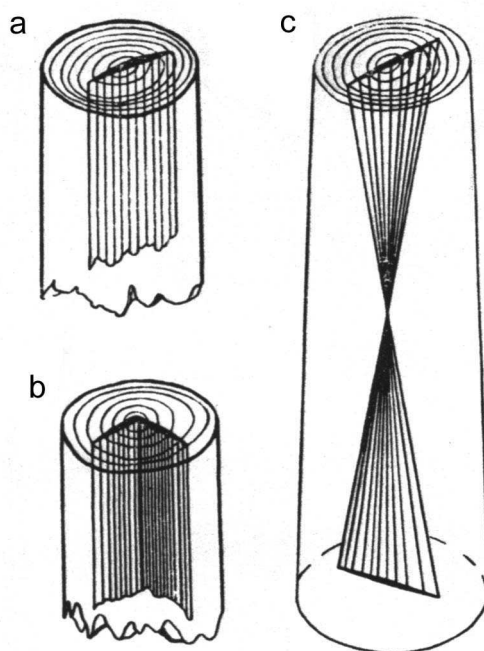
Przyjąć można, że zmniejszanie się wytrzymałości drewna jest proporcjonalne do zmniejszania się jego ciężaru właściwego (gęstości). Ciężar ten w miarę postępowania zgnilizny maleje, chociaż stwierdzono że w pewnych przypadkach w początkowym stadium zgnilizny – ciężar objętościowy nieznacznie wzrasta. W końcowym stadium gęstość surowca może być 2 ÷ 2,5 razy mniejsza od gęstości drewna zdrowego [Wanin 1953]. Twardość drewna w końcowym stadium gnicia jest 17 ÷ 35 razy mniejsza od twardości drewna zdrowego. Na ogół przyjmuje się, że w początkowym stadium zgnilizny drewna tylko nieznacznie różni się od drewna zdrowego (8 ÷ 12%) i może być używane jako drewno użytkowe [Wanin 1953].

Z uwagi na cel pracy, w której zajmowano się drewnem zdrowym założono, że porównywane próbki drewna nie zawierają oznak zgnilizny.

### 2.7.5. Wpływ pęknięć (szczelin) na wytrzymałość drewna

Pęknięcia i szczeliny z wyraźnym rozstępem drewna to mniej lub bardziej wzdłużne rozerwania drewna pod wpływem naprężeń wewnętrznych przekraczających wytrzymałość drewna na rozciąganie w poprzek włókien. Wyróżnia się pęknięcia mrozowe, rdzeniowe i łukowe. **Pęknięcia mrozowe** powstają przy powierzchni pnia na skutek działania silnych mrozów. Po ustaniu mrozów pęknięcia zamykają się i na wiosnę obrastają kolejnym słojem rocznym, zwykle w tym miejscu zgrubiałym. Gdy zgrubienie okazuje się niedostateczne w czasie kolejnych zim proces pęknięcia słoja rocznego się powtarza i powstaje tzw. listwa mrozowa, składająca się ze zgrubień słoików rocznych w pobliżu pęknięcia. Jest to istotna wada drewna, zwłaszcza że często występuje łącznie z gniciem drewna.

**Pęknięcia rdzeniowe** to wewnętrzne pęknięcia pnia przebiegające w kierunku promieniowym (rys. 25).



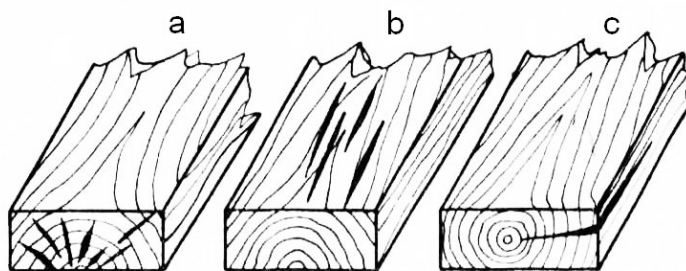
Rys. 25. Przykłady położenia pęknięć wewnętrznych: a) proste, b) złożone, c) wichrowate [Perełygin 1971]

Przebiegają one wzdłuż strzały od odziomka i niekiedy dochodzą do korony. W materiałach tartych (tarcicy) pęknięcia obserwuje się na czołach elementów,

zwłaszcza na odziomkowych. Pęknięcia rdzeniowe są trudne do wymanipulowania, zwłaszcza gdy są wichrowate.

**Pęknięcia łukowe** polegają na odspojeniu słoju rocznych i przebiegają między słojami. Pęknięcia łukowe mogą być częściowe i pełne (okrężne) i nie muszą być widoczne od zewnątrz pnia. Widoczne są natomiast na czołach wałków i tarcicy w postaci łuków i okręgów. Na podłużnych przekrojach materiałów tartych zaznaczają się one w postaci podłużnych szczelin lub wyłobień.

Podczas suszenia pod działaniem naprężeń wewnętrznych powstają tzw. **pęknięcia suszarnicze** (rys. 26). Są one zwykle płytsze i krótsze (zwykle nie więcej niż 1 m) od pęknięć mrozowych i rdzeniowych w drzewach rosnących.



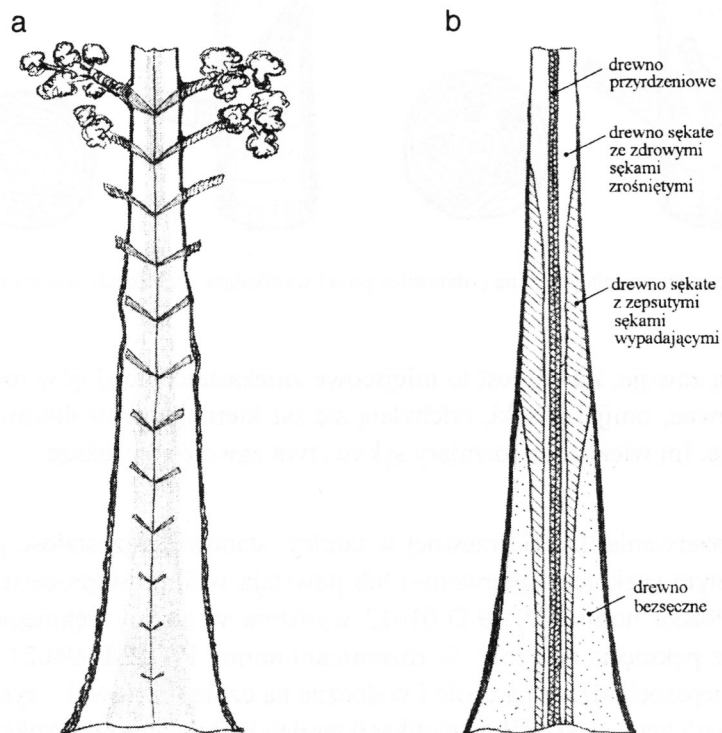
Rys. 26. Przykład pęknięć suszarniczych występujących w tarcicy: a) pęknięcie czołowe, b) pęknięcie na płaszczyźnie nieprzechodzące na czoło, c) pęknięcie czołowe nieprzechodzące [Perełygin 1971]

Pęknięcia naruszają ciągłość drewna i w związku z tym obniżają jego właściwości mechaniczne. Stopień wpływu pęknięć na te właściwości istotnie zależy od wymiarów i charakteru pęknięć, od ich ukierunkowania względem sił obciążających i rodzaju obciążeń. Najmniejsze obniżenie wytrzymałości z powodu pęknięć obserwuje się przy ściskaniu wzdłuż włókien. Szczelina przelotowa przy ściskaniu wzdłuż włókien obniża wytrzymałość o 5 ÷ 10% [Perełygin 1971]. Największy ujemny wpływ na wytrzymałość mają pęknięcia przy rozciąganiu w poprzek włókien (jeżeli pęknięcie jest położone w płaszczyźnie prostopadłej do sił obciążających. Przy zginaniu największy wpływ mają pęknięcia położone w strefie obojętnej (w pobliżu środka belki) jeżeli jest położona w płaszczyźnie prostopadłej do obciążenia. Spowodowane to jest zmniejszeniem się rzeczywistej powierzchni pracującej na ścinanie pod działaniem maksymalnych naprężeń stycznych (w warstwie obojętnej).

Najmniejszy wpływ na zginanie mają pęknięcia w płaszczyznach pokrywających się z płaszczyzną obciążenia.

### 2.7.6. Wpływ sękatości na wytrzymałość drewna

Sęki to wrośnięte w drewno pozostałości po odpadłych lub odciętych gałęziach [Krzysik 1975, Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005] zaczynające się przy rdzeniu i pogrubiające się w miarę zbliżania do obwodu pnia (rys. 27 a).



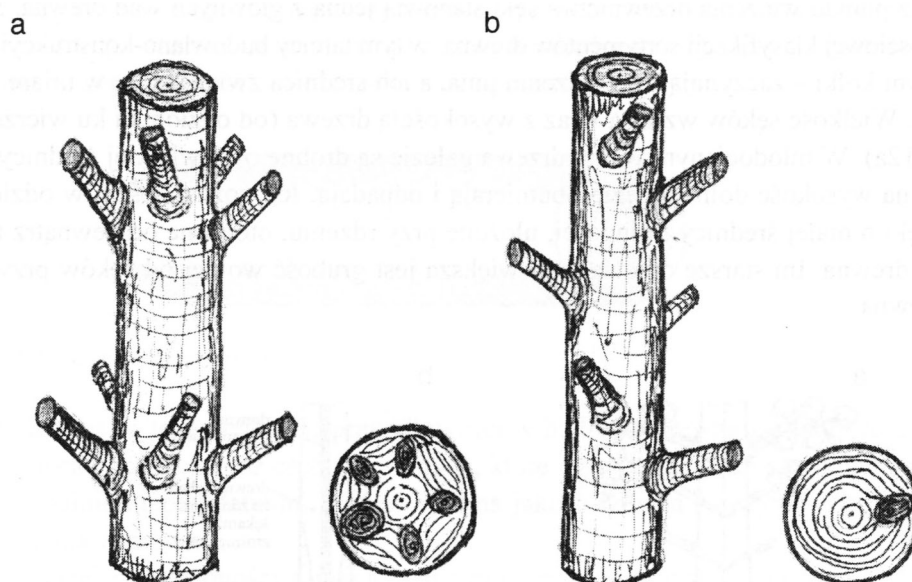
Rys. 27. Układ sęków w drewnie iglastym: a) rozmieszczenie sęków wzdłuż pnia, b) strefy sękatości [Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005]

Na podstawie rozmieszczenia sęków rozróżnia się w strzale drzew iglastych następujące strefy drewna (rys. 27 b):

- 1) bezsęczonej strefy odziomkowej drewna,
- 2) strefę drewna sękatego z zepsutymi sękami wypadającymi,
- 3) strefę drewna sękatego ze zdrowymi sękami zrośniętymi,
- 4) strefę drewna przyrdzeniowego (niskojakościowego), gdzie występują sęki zdrowe, otwarte z wystającymi na zewnątrz tyłkami gałęzi.



Wskaźnikiem wysokiej jakości drewna sosnowego jest długość strefy bezsęczonej. Rozmieszczenie gałęzi i sęków na pniu może być nieregularne lub w regularnie rozstawionych okółkach (rys. 28), jak np. u sosny.

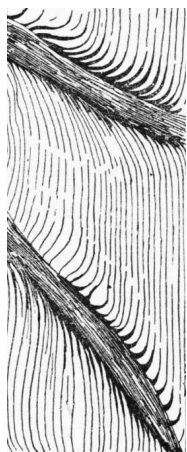


Rys. 28. Przykłady rozmieszczenia gałęzi na poboczniczy pnia i wynikające stąd układy sęków: a) w okółkach, b) nieregularny [Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005]

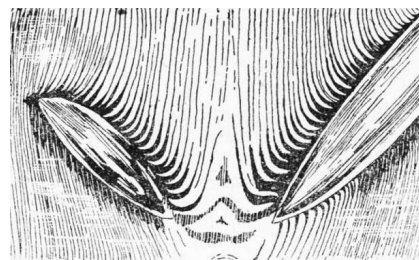
W drewnie iglastym sęki występują głównie w okółkach, które stanowią najsłabsze miejsca tarcicy. Mała wytrzymałość najsłabszego okółka determinuje wytrzymałość całej sztuki tarcicy. Istotne jest ile sęków i o jakiej średnicy rozmieszczonych jest w okółku i w jaki sposób sęki rozmieszczone są na przekroju poprzecznym tarcicy.

Wpływ sękatości (występowania w drewnie sęków) na wytrzymałość drewna zależy od ilości sęków, ich wielkości, rozmieszczenia, zdrowotności ich drewna oraz powiązania z drewnem pnia. Sęki zdrowe i rogowe (ciemne, silnie przesycone żywicą) mają drewno zdrowe. Sęki zabarwione są zwykle otoczone drewnem zdrowym ale same znajdują się w początkowym stadium zgnilizny. Rozróżnia się sęki zrosnięte z drewnem pnia i sęki nie zrosnięte, które cechują się podatnością na wypadanie z elementów tartych lub zgnilizną. Wyróżnia się sęki niezrosnięte: wypadający twarde (o drewnie zdrowym), nadpsuty, czarny smołowy i tabacznym. Sęki czarny smołowy i tabacznym cechują się ostatnimi stadiami gnicia drewna.

Ujemny wpływ sęków otwartych na mechaniczne właściwości drewna występuje w znacznie silniejszym stopniu w tarcicy niż w sortymentach okrągłych. Stąd też badanie wpływu sękatości na wytrzymałość drewna dotyczy zwykle materiałów tartych. W zależności od kierunku sęków w strzale drzewa i kierunków przecięcia strzały sęki mogą znaleźć się na powierzchni tarcicy w postaci koła, elipsy, klina lub pasma. Im większa część sęka znajduje się na powierzchni tarcicy tym słabiej się on trzyma w desce i łatwiej może wypaść. Najbardziej niekorzystne z uwagi na wytrzymałość jest wzdłużne przecięcie sęka. Powstaje wtedy tzw. pasierb (rys. 29). Podobnie osłabiają tarcicę sęki skrzydlate (rys. 30).



Rys. 29. Sęk podłużny [Wanin 1953]



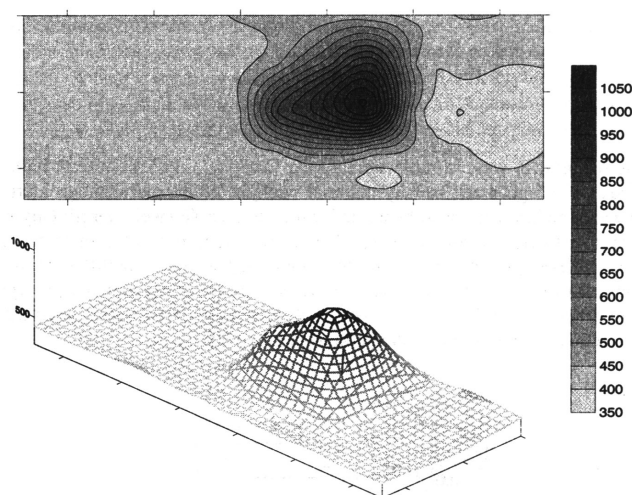
Rys. 30. Sęk skrzydlaty [Wanin 1953]

Sęki naruszają jednorodność drewna zarówno przez swoje występowanie jak i przez wytworzenie się dookoła sęka lokalnej zawilóści włókien. Gęstość drewna sęków u ich nasady jest do 3 razy większa niż gęstość drewna poza sękiem [Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005]. Zmienia się ona stopniowo w tzw. strefie przysęczonej (rys. 31). Wpływ sęka na lokalną gęstość drewna w tej strefie kończy się w odległości od sęka równej jego średnicy. Tak więc należałoby się spodziewać, że drewno w strefie przysęczonej jest bardziej wytrzymałe od drewna oddalonego od sęka. Poza tą strefą obecność sęków obniża wytrzymałość drewna.

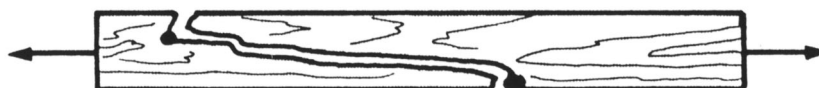
Według Wanina [1953] obecność sęków szczególnie silnie zmniejsza wytrzymałość drewna na rozciąganie wzdłuż włókien. Przykład wpływu sęków

na wytrzymałość tarcicy na rozciąganie wzdłuż włókien pokazano na rys. 32. Zawilóść włókien w pobliżu sęków ułatwiła skośne ścięcie drewna.

W porównaniu z drewnem bezsęcznym wytrzymałość na rozciąganie drewna sosnowego mało sękatego jest mniejsza o 51%, a bardzo sękatego – o 85% [Perełygin 1971, Krzysik 1975].



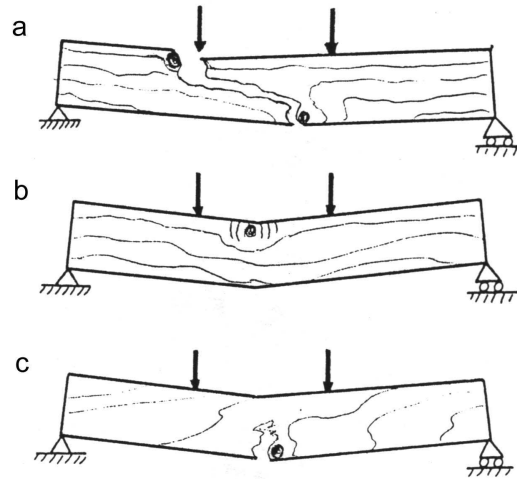
Rys. 31. Rozkład gęstości w uszcznionym fragmencie tarcicy sosnowej, wizualizacja płaska i przestrzenna rozkładu gęstości w badanym obszarze [Dzbeński, Kozakiewicz, Krzosek 2005]



Rys. 32. Przykład zmniejszenia wytrzymałości drewna na rozciąganie wzdłuż włókien poprzez obecność sęków [Madsen 1992]

Przy ścisaniu wzdłuż włókien wytrzymałość drewna sosnowego mało sękatego jest mniejsza o 10%, a bardzo sękatego o 20 ÷ 40%. Natomiast ze wzrostem sękatości wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien wzrasta. Przy zginaniu statycznym prostopadle do włókien wpływ sęków zależy od ich średnicy i rozmieszczenia (rys. 33).

Drobne sęki nie okazują dużego wpływu. Sęki położone w pobliżu środka prześwitu i napory przy zewnętrznych włóknach rozciąganych znacznie obniżają wytrzymałość drewna na zginanie i udarność. Sęki rozmieszczone w strefie ścisanej wywierają mniejszy wpływ na obniżenie wytrzymałości. Sęki umiejscowione w sąsiedztwie podpór nie wywierają istotnego wpływu.



Rys. 33. Typy zniszczeń tarcicy przy zginaniu, spowodowane przez sęki: a) ukośne rozciąganie, b) ściskanie w pobliżu sęka, c) miejscowe rozciąganie w poprzek włókien [Madsen 1992]

Wpływ otworów po sękach na wytrzymałość jest podobny do wpływu sęków. Obniżenie udarności dochodzić może do 70% niezależnie od średnicy sęka i jego położenia [Wanin 1953]. Przy tym złamanie próbki przy zginaniu i udarności przebiega nie przez sęk, lecz w bezpośrednim jego sąsiedztwie, w obszarze zakrzywienia włókien (zawoje). W tym upatruje się główny powód osłabienia drewna sękatego [Wanin 1953, Perełygin, Ugolew 1971]. Potwierdzają to badania przeprowadzone w Kanadzie [Mindess, Madsen 1986]. Uderzeniu poddawano beleczki świerkowe o przekroju 38x140 mm, przy prześwicie 610 mm. Prędkość pionowego młota w chwili uderzenia wynosiła 3,3 m/s. Uderzenie fotografowano kamerą umożliwiającą wykonywanie zdjęć z prędkością 500 klatek na sekundę (jedną klatkę co 2 milisekundy). Badano trzy serie próbek – czystych (bez wad), z pionowym nacięciem pośrodku prześwitu w dolnej części włókien rozciąganych przy zginaniu i z sękiem zlokalizowanym podobnie jak nacięcie. Próbki z sękiem ulegały zniszczeniu dwa razy szybciej niż czyste i z nacięciem; czyste ulegały zniszczeniu po 18 ms, z nacięciem – po 12 ms, a z sękiem – po 8 ms. Ognisko zniszczenia widoczne było już w 4 ms w odległości 10 mm od sęka, w zakrzywionych słojach otaczających sęk, a w 8 ms pęknięcie rozprzestrzeniło się w górę na proste słoje.

Stopień wpływu sęka na wytrzymałość drewna zależy od jego położenia i względnych wymiarów – od stosunku jego grubości  $g$  do wymiarów  $b$  elementu

w którym się znajduje. Ten sam sęk w małym elemencie z drewna wpływa na wytrzymałość silniej niż w dużym elemencie (wyrobie). Najmniejszy ujemny wpływ wywierają sęki zdrowe, okrągłe i w pełni zrosnięte z drewnem, największy ujemny wpływ wywierają sęki podłużne – pasierby i skrzydlate. Wpływ względnych wymiarów sęków na wytrzymałość tarcicy sosnowej (krawędziaków z sękami na węższej powierzchni bocznej i desek z sękami na szerszej powierzchni – w środkowej części) podano w tabeli 12.

Tabela 12. Wpływ względnych wymiarów sęków na wytrzymałość tarcicy sosnowej [Perełygin 1971]

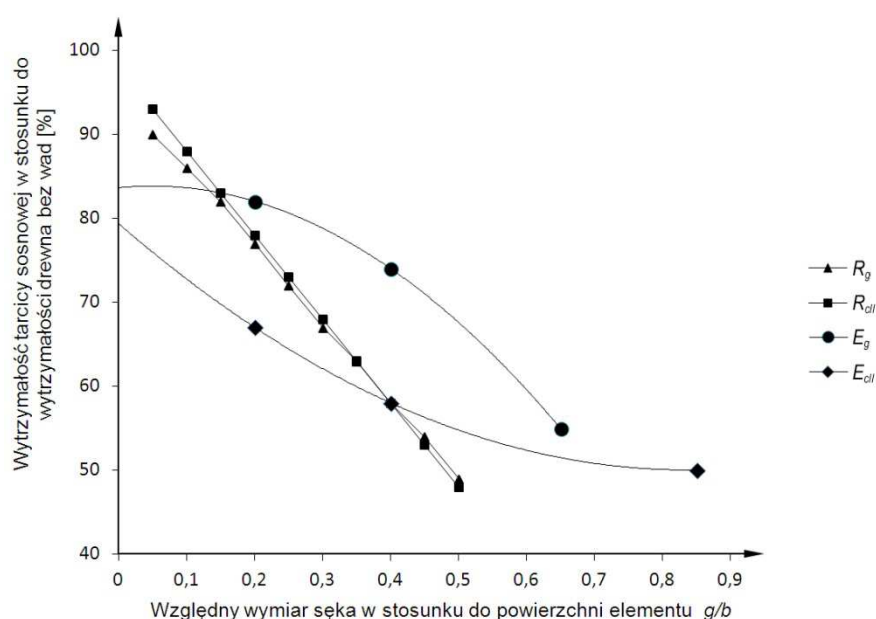
Względny wymiar sęka w stosunku do powierzchni elementu $g/b$	Wytrzymałość tarcicy sosnowej w stosunku do wytrzymałości drewna bez wad [%]	
	Przy zginaniu statycznym $R_g$	Przy ścisnaniu wzdłuż włókien $R_{CII}$
0,05	90	93
0,10	86	88
0,15	82	83
0,20	77	78
0,25	72	73
0,30	67	68
0,35	63	63
0,40	58	58
0,45	54	53
0,50	49	48

Opracowane na podstawie tabeli 12 zależności wytrzymałości drewna sosnowego odniesionej do wytrzymałości drewna bezsęcznego ( $R_g/R_{g0}$ ) od względnych wymiarów sęków ( $g/b$ ) zarówno przy zginaniu statycznym jak i ścisnaniu wzdłuż włókien można przedstawić następująco:

$$\frac{R_g}{R_{g0}} = 94,56 - 91,11 \frac{g}{b} \quad [\%], \quad (29)$$

gdzie  $\frac{g}{b} \in < 0,05; 0,50 >$ .

Moduł sprężystości  $E_g$  przy zginaniu statycznym wyraźnie maleje przy względnym wzroście wymiarów sęków (przy  $g/b = 0,2; 0,4$  i  $0,64$   $E_g$  mała odpowiednio do 82, 74 i 55%). Moduł sprężystości przy ściskaniu wzdłuż włókien już przy małych sękach  $g/b = 0,2$  zmniejszył się do 67% ale przy dalszym wzroście wymiarów sęków malał mniej intensywnie (przy  $g/b = 0,4$  i  $0,85$   $E_{cII} = 58$  i 50%). Natomiast moduły sprężystości przy rozciąganiu i ściskaniu w poprzek włókien przy względnym wzroście wymiarów sęków silnie wzrastają w związku z dużą sztywnością drewna sęków.



Rys. 34. Zależność wytrzymałości drewna sosnowego od względnego wymiaru sęków [Perehygin 1971]

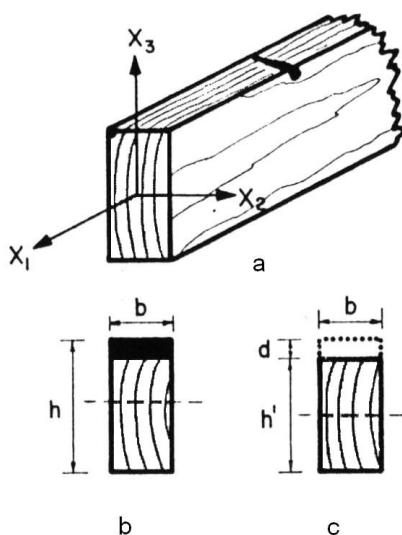
Z badań Kozakiewicza [2002] wynika, że ze zmniejszeniem się klasy jakości tarcicy sosnowej (zależnej od uszczerbienia drewna), w porównaniu z drewnem bezsęcznym moduł odkształcenia postaciowego i wytrzymałość na ścinanie wzdłuż włókien coraz bardziej istotnie maleją (tabela 13).

Większość związków pomiędzy wytrzymałością, a wadami drewna ustalona jest doświadczalnie, jednakże w pewnych przypadkach zmniejszanie się wytrzymałości określić można na podstawie prostych zależności wytrzymałościowych.

Tabela 13. Wpływ klasy jakości tarcicy na moduł odkształcenia postaciowego i wytrzymałość na ścinanie wzdłuż włókien [Kozakiewicz 2002]

Rodzaj drewna	Moduł odkształcenia postaciowego			Wytrzymałość na ścinanie		
	$G$ [MPa] (średnie wartości)	$\sigma_G$ [MPa] (odchylenie standardowe)	$V$ [%] (współczynnik zmienności)	$R_{ctI}$ [MPa]	$\sigma_{Rt}$ [MPa]	$V$ [%]
Drewno bezsęczone bali sosnowych	1002	92	0,09	6,30	0,70	0,11
Bale sosnowe	862 ÷ 913	90 ÷ 147	0,14	5,20 ÷ 5,80	0,98 ÷ 1,01	0,18
Drewno bezsęczone łął sosnowych	848	79	0,09	6,65	0,78	0,12
Łaty sosnowe	688 ÷ 835	73 ÷ 104	0,12	4,91 ÷ 6,15	0,79 ÷ 1,06	0,17
Drewno bezsęczone bali świerkowych	842	90	0,11	5,73	0,64	0,11
Bale świerkowe	746 ÷ 827	90 ÷ 112	0,12	4,67 ÷ 5,95	0,66 ÷ 1,02	0,15

Bodig i Jayne [1982] zaproponowali na przykład zmniejszanie rzeczywistej powierzchni pracującej na rozciąganie lub zginanie o część przekroju osłabionego o wadę taką jak pojedynczy sęk. „Czysty” przekrój pracujący na rozciąganie (rys. 35) ma pole przekroju  $F = bh$ , a osłabiony sękiem o średnicy  $d - F_1 = b(h - d)$ .



Rys. 35. „Czysta” powierzchnia przekroju pracująca na rozciąganie [Bodig, Jayne 1982]

Dopuszczalne obciążenie, (przy naprężeniach dopuszczalnych  $k_r$ ) wynosiłoby:

- w przypadku pręta bez wad:

$$N = k_r F = k_r b h, \quad (30)$$

- w przypadku pręta z wadą (sęką):

$$N_1 = k_r F_1 = k_r b (h - d). \quad (31)$$

Oznacza to, że współczynnik wyrażający obniżenie wytrzymałości na rozciąganie z uwagi na wadę  $k_{wr}$  byłby równy:

$$k_{wr} = \frac{N_1}{N} = \frac{h - d}{h}. \quad (32)$$

Analogicznie przy zginaniu w płaszczyźnie pionowej dopuszczalny moment gnący byłby równy:

$$M_g = k_g W_g = k_g \frac{b h^2}{6} \quad (33)$$

oraz

$$M_{g1} = k_g W_{g1} = k_g \frac{b (h - d)^2}{6}, \quad (34)$$

a współczynnik obniżenia wytrzymałości na zginanie z uwagi na wadę:

$$k_{wg} = \frac{M_{g1}}{M_g} = \frac{(h - d)^2}{h^2} \quad (35)$$

przy przekroju 1,5x5,5 cm  $k_{wr} = 0,818$ , a  $k_{wg} = 0,669$ . Oznacza to, że sęk bardziej zmniejsza wytrzymałość na zginanie niż wytrzymałość na rozciąganie.



Taka analiza w przypadku pojedynczej wady jest prosta. Trudniej jest w przypadku kilku wad. Ale i tu zaleca się kilka sęków na przekroju, obliny, pęknięć, skrętu włókien traktować je jako jedną wadę.

Umieszczenie „najgorszej” wady w belce jest zjawiskiem przypadkowym (ma naturę stochastyczną). W 1989 roku w Kanadzie przeprowadzono badania nad wpływem miejsca występowania najgorszej wady (np. sęka) w próbce z tarcicy świerkowo – sosnowo – jodłowej na wytrzymałość na zginanie [Madsen 1992]. Badano próbki o grubości 38 mm, wysokości  $h = 89$  i  $184$  mm oraz długości prześwitu  $S$  belki równej  $S = 7h$ ,  $17h$  i  $25h$ . Próbki te wycięto z desek o długości 2440 i 6096 mm, dobieranych w tartaku przez kilka miesięcy z tarcicy drugiej klasy wytrzymałości tak by był w niej sęk; w jednej próbce – umiejscowiony przypadkowo, a w następnej części – w środkowej 1/3 części prześwitu (pomiędzy dwoma naporami). Wytrzymałość na zginanie próbek o tendencyjnie wybranym umiejscowieniu sęka dla próbek krótkich (o  $S = 7h$ ) stanowiła  $58 \div 68\%$  wytrzymałości próbek o przypadkowym położeniu sęka na długości prześwitu. Dla próbek dłuższych (o  $S = 17h$ ) wytrzymałość przy sęku pomiędzy naporami stanowiła  $77 \div 85\%$  wytrzymałości próbek o przypadkowym położeniu sęka, a dla próbek najdłuższych (o  $S = 25h$ ) –  $65 \div 95\%$ .

Wprowadzono też [Madsen 1992] indeks  $i$  (Randomness Index) mający określać prawdopodobieństwo lokalizacji najgorszej wady (np. sęka) poza strefą maksymalnego obciążenia próbki (pomiędzy naporami przy czteropunktowym zginaniu; tzn. przy dwóch podporach i dwóch symetrycznych naporach odległych od siebie o  $1/3 s$ ):

- przy jednej najgorszej wadzie (sęku) w obrębie deski o długości  $L$  z której wycięto próbkę o prześwicie  $S$ :

$$i = \frac{L - \left(\frac{2}{3}\right)S}{L}, \quad (36)$$

- przy  $n$  najgorszych wadach w obrębie deski:

$$i = \frac{L - \left(\frac{2}{3}\right)^n S}{L}. \quad (37)$$

Dla omawianych wyżej najkrótszych próbek ( $\sigma \frac{s}{h} = 7$ ), przy długości desek z których próbkę wyrzynano  $L = 2440 \div 6096$  mm  $i = 0,82 \div 0,93$ . Dla dłuższych próbek ( $\sigma \frac{s}{h} = 17$ )  $i = 0,68 \div 0,83$ , a dla najdłuższych ( $\sigma \frac{s}{h} = 25$ )  $i = 0,39 \div 0,76$ . Przy trzech wadach indeks  $i \approx 60$ .

### 2.7.7. Wpływ skrętu włókien na wytrzymałość drewna

Obecność skrętu włókien w drewnie polega na tym, że nie przebiegają one równoległe do osi pnia lecz ukośnie, pod pewnym kątem (spiralnie). Kąt nachylenia włókien w obrębie strzały wzrasta od odziomka do wierzchołka. Na przekroju poprzecznym największy skręt jest przy obwodzie i wyraźnie zmniejsza się w kierunku rdzenia, a w środkowej części pnia zwykle zanika.

Skręt włókien wyraża się w procentach:

$$\varphi = \frac{e}{l} 100\%, \quad (38)$$

gdzie  $e$  – odchylenie włókien od linii prostej na odcinku  $l$  pnia.

Wpływ skrętu włókien na właściwości mechaniczne staje się wyraźny, gdy jego wielkość przekracza  $6 \div 10\%$  [Wanin 1953]. Wytrzymałość na zginanie w kierunku stycznym przy skręcie  $10 \div 15\%$  zmniejsza się o  $8 \div 10\%$ . Wytrzymałość na ściskanie i ścinanie oraz udarność w płaszczyźnie promieniowej zmniejsza się po przekroczeniu  $13\%$  wartości skrętu. Wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien wyraźnie spada poczynając od  $6\%$  skrętu. Wytrzymałość na zginanie statyczne przy skręcie włókien powyżej  $6\%$  wyraźnie spada.

Tabela 14. Porównanie rodzajów wytrzymałości drewna w zależności od wielkości skrętu włókien [Leontev 1970]

$\varphi$ [%]	0 ÷ 3	6	9	12	15
$R_g$ [%] (zginanie)	100	98,5	95,5	89,4	85,0
$R_{cII}$ [%] (ściskanie wzdłuż włókien)	100	99,0	96,4	97,3	–
$R_{rII}$ [%] (rozciąganie wzdłuż włókien)	100	100	80,4	76,1	–
$U$ [%] (udarność)	100	100	–	95,5	–

Wpływ skrętu włókien na rozciąganie wzdłuż włókien zaznacza się silnie po przekroczeniu skrętu 6%, a na ściskanie i udarność wpływ ten jest nieznaczny. Wpływ pozornego skrętu włókien (wynikającego ze zbieżności strzały i kierunku przetarcia drewna) jest jeszcze większy, co wynika z tabeli 15 [Perełygin 1971] (w której raczej powinno się mówić o ścisaniu i rozciąganiu wzdłuż próbki).

Tabela 15. Wpływ wielkości skrętu włókien na wytrzymałość drewna na ściskanie i zginanie wzdłuż włókien [Perełygin 1971]

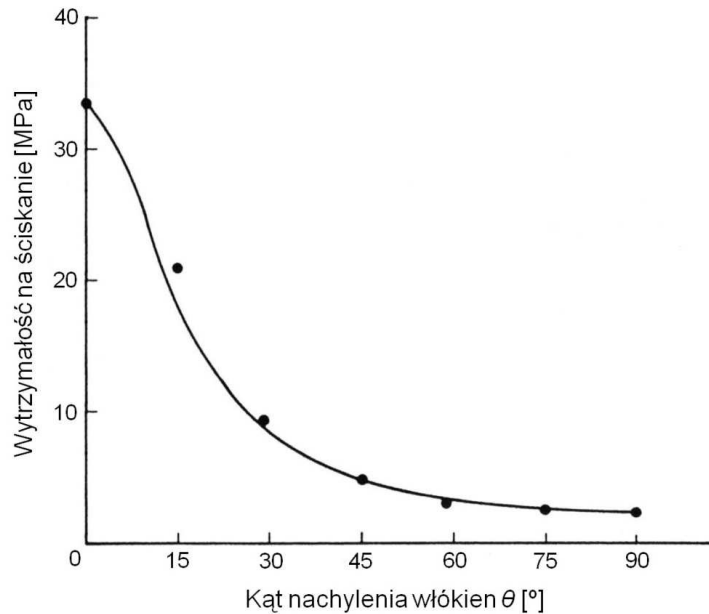
Rodzaj wytrzymałości	Wytrzymałość przy skręcie włókien $\varphi$ [%]			
	5	9	17,5	27
Przy ścisaniu wzdłuż włókien $R_{CII}$ [%]	99,5	96,5	90,5	80,0
Przy zginaniu wzdłuż włókien $R_{III}$ [%]	94,0	90,5	66,0	51,5

Skręt włókien wyrazić też można za pomocą kąta nachylenia włókien  $\theta$  w stosunku do kierunku siły obciążającej. W oparciu o ten kąt i wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien  $R_{CII}$  (przy  $\theta = 0^\circ$ ) i w prostopadłe do włókien  $R_{C\perp}$  (przy  $\theta = 90^\circ$ ) wytrzymałość drewna na kierunku określonym kątem  $\theta$  obliczyć można za pomocą wzoru Hankinsona [Bodig, Jayne 1982], znanego od 1921 roku:

$$R_C = \frac{R_{CII}R_{C\perp}}{R_{CII}\sin^n\theta + R_{C\perp}\cos^n\theta} \quad (39)$$

Wykładnik potęgi  $n$  przyjmuje się zwykle za równy 2 [Cowin 1979], chociaż część autorów twierdzi, że wartość  $n$  powinno się określać doświadczalnie [Kollman, Coté 1968]. Wzór (39) zwany jest „dwuwymiarowym wzorem Hankinsona”, a zależność  $R_c(\theta)$ , potwierdzona doświadczalnie przedstawia się tak jak na rys. 36. Na wschodzie Europy wzór (39) znany jest jako „wzór Dieszewoja”.

W tabeli 16 podano dane ilustrujące duży wpływ skrętu włókien na obniżenie wytrzymałości drewna przy zginaniu oraz osiowym rozciąganiu i ścisaniu w porównaniu z drewnem bez tej wady [Bodig, Jayne 1982].



Rys. 36. Graficzne zobrazowanie wytrzymałości na ściskanie drewna na kierunku określonym kątem nachylenia włókien ( $\theta$ ) obliczone za pomocą wzoru Hankinsona [Bodig, Jayne 1982]

Tabela 16. Wpływ skrętu włókien na obniżenie wytrzymałości drewna przy zginaniu, osiowym rozciąganiu i ściskaniu [Bodig, Jayne 1982]

Skręt włókien [%]	16,67	12,5	10,0	8,33	7,14	6,67	6,25	5,5	5,0
Wytrzymałość przy zginaniu lub rozciąganiu	40	53	61	69	74	76	80	85	100
Wytrzymałość przy ściskaniu wzdłuż włókien	56	66	74	82	87	100	–	–	–

### 2.7.8. Wpływ twardzicy na wytrzymałość drewna

Występowanie twardzicy cechuje się nierównomiernymi grubościami słoików rocznych; z jednej strony pnia są one cienkie i o normalnej barwie, a z drugiej strony – ściskanej są znacznie grubsze i zabarwione. Szerokość słoja rocznego twardzicowej części pnia przewyższa szerokość słoja drewna normalnego przeciętnie o 2,5 razy (niekiedy 5 – krotnie). W drewnie twardzicowym słoja rocznego znajduje się 3 ÷ 4 razy więcej drewna późnego niż w słoju rocznym drewna normalnego, a grubość ścianek cewek drewna twardzicowego jest dwukrotnie większa niż w drewnie normalnym [Wanin 1953]. Znacznie pogrubiona jest tam środkowa warstwa błony wtórnej, a długość

cewek stanowi  $0,6 \div 0,8$  długości cewek normalnych. Nachylenie włókien (fibryli) w ściankach cewek twardzicy zwiększa się  $1,5 \div 2$  razy, zawartość ligniny – zwiększa się o 5%, a ilość celulozy, np. u świerka zmniejsza się o 7%.

Ciężar objętościowy (gęstość) drewna twardzicowego w stanie suchym jest znacznie wyższy niż drewna normalnego; przeciętnie o 43%, a dochodzi do 75% [Wanin 1953]. Niektóre właściwości drewna twardzicowego polepszają się, a inne pogarszają. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie oraz twardość czołowa drewna twardzicowego są znacznie większe niż drewna normalnego. Wytrzymałość drewna świerkowego na ściskanie jest wyższa przeciętnie o 31%, na zginanie o 18%, a twardość czołowa o około 100% [Perełygin 1971].

Wytrzymałość drewna sosnowego twardzicowego jest jeszcze większa przeciętnie przy ściskaniu o 51%, zginaniu statycznym o 83%, a twardość czołowa o 188% [Perełygin 1971].

Przy rozciąganiu wzdłuż włókien drewno twardzicowe jest znacznie słabsze od normalnego. Dla suchego drewna świerkowego, według badań japońskich (za Bodig i Jayne [1982]), właściwości drewna normalnego i twardzicowego są odpowiednio równe: wytrzymałość  $R_{rII} = 233,4$  MPa i 79,4 MPa, odkształcenia względne w momencie zniszczenia:  $\varepsilon = 0,0208$  i 0,0361, granica proporcjonalności  $R_{pr} = 144,1$  MPa i 40,2 MPa, moduł sprężystości  $E_{II} = 11,87$  GPa i 5,69 GPa. Istotne zmniejszenie się modułu sprężystości dla świerka stwierdzili i inni badacze [Arnold, Steiger 2006, Glos, Denzler 2004].

Wyraźne zwiększenie kąta nachylenia włókien w cewkach drewna twardzicowego przyczynia się (sprzyja) do zwiększenia intensywności suszenia lub pęcznienia drewna wzdłuż włókien i do zmniejszenia tych procesów w poprzek włókien. Wyraźna różnica w wysuszeniu drewna normalnego i twardzicowego wywołuje silne wypaczenie i pękanie tarcicy z twardzicą. Krawędziaki z dużą zawartością twardzicy podczas suszenia mogą pękać w miejscach, w których występuje twardzica.

## 2.8. Wnioski wypływające z przeglądu literatury przedmiotu

1. Z przedstawionej wyżej technicznej budowy drewna i jego anizotropii (na ogół nie znanej projektantom elementów drewnianych) wynika, że sposób zniszczenia drewna i jego wytrzymałość istotnie zależy od kierunku obciążenia, rodzaju pracy wytrzymałościowej i objętości badanej próbki. Próbki małe, o względnie jednorodnej budowie drewna na ogół niszczone są z uwagi na słabość drewna wczesnego. Zwiększanie objętości próbek przy zachowaniu ich „jednorodności” nie powinno więc wpływać na istotny wzrost efektu skali. Przy tym zależnie od ukierunkowania płaszczyzny obciążenia i kierunku obciążenia zmniejszanie się wytrzymałości drewna ze wzrostem tej „jednorodnej” próbki zależy albo od parametrów wytrzymałościowych tkanek drewna wczesnego (na przykład przy ściskaniu i rozciąganiu w kierunku promieniowym) albo od wytrzymałości i sztywności drewna późnego (przy ściskaniu, rozciąganiu i zginaniu w kierunku stycznym). Przy rozciąganiu wzdłuż włókien mechanizm zniszczenia drewna późnego polega na zniszczeniu połączeń sąsiadujących cewek tego drewna, a mechanizm zniszczenia drewna wczesnego – na rozerwaniu ścianek cewek tego drewna (znacznie słabszych od ścianek cewek drewna późnego). Oznacza to konieczność każdorazowego określania udziału drewna wczesnego i późnego w badanych próbkach. Z dalszym wzrostem wymiarów próbek zmniejsza się ich „czystość” i o efekcie skali decydują niejednorodności drewna i orientacja elementów budowy drewna względem sił obciążających próbkę.
2. Badając efekt skali, w odniesieniu do wytrzymałości i stałych sprężystych drewna, na próbkach o przekroju poprzecznym do  $20 \text{ cm}^2$  drewno można traktować jako materiał warstwowy o warstwach drewna wczesnego i drewna późnego przyjmowanych jako ciała quasijednorodne i quasiciągłe. Próbki drewna o przekroju poprzecznym  $20 < F < 100 \text{ cm}^2$  należałoby traktować jako ciało ortotropowe lub transwersalno–izotropowe, w zależności od przypadku czy konieczne jest uwzględnianie różnic własności sprężystych i wytrzymałościowych w różnych kierunkach prostopadłych do włókien czy nie. Wyroby z drewna o grubości przekroju poprzecznego powyżej 10 cm, które zwykle cechuje różnorodna orientacja

słojów rocznych względem krawędzi wyrobu i kierunku obciążenia można traktować jako ciało transwersalno–izotropowe.

3. Teoretycznie zasadne, podczas badań efektu skali, wymogi podobieństw próbki i wyrobu z drewna w praktyce są trudne albo wręcz praktycznie niemożliwe do spełnienia. Nawet podobieństwo geometryczne różnych próbek lub próbki i wyrobu z drewna litego spełnić można tylko w niektórych przypadkach. Na przykład znormalizowana próbka na ściskanie wzdłuż włókien  $2 \times 2 \times 3$  cm, wycięta zgodnie z kierunkami ortotropii drewna, przy zachowaniu podobieństwa geometrycznego może być powiększona co najwyżej  $3 \div 4$  – krotnie (do wymiarów  $6 \times 6 \times 9$  cm lub  $8 \times 8 \times 12$  cm). Powyżej grubości  $6 \div 8$  cm przekroju poprzecznego próbkę należy traktować jako ciało transwersalno – izotropowe (monotropowe); przy tym przy wzroście próbki z zachowaniem podobieństwa geometrycznego do  $30 \times 30 \times 45$  cm próbka najczęściej ma wady i niejednorodności na każdym poziomie struktury drewna. Zrozumiałe jest więc, że w szeregu badań zajmowano się jedynie wpływem tylko jednego wymiaru – długości próbki albo też zamiast litego drewna efekt skali badano na drewnie klejonym. Jest to zresztą najbardziej efektywny sposób wykorzystania drewna do celów konstrukcyjnych. Tak więc zdaniem Autora w drewnie bez widocznych wad nawet przy zachowaniu podobieństwa geometrycznego zmniejszanie się jego wytrzymałości wynika nie tylko ze wzrostu wymiarów próbki ale i ze zmiany rodzaju ciała za jakie drewno można uważać – od quasiizotropowego, przez ortotropowe i do transwersalno–izotropowego. Dalsze nasilanie się efektu skali wynika ze wzrostu niejednorodności drewna.
4. Istotne osłabienie próbek i wyrobów z drewna powstaje wtedy gdy „najsłabsze ogniwo” drewna wynikające z jego niejednorodności znajdzie się w strefie najbardziej naprężonej. Jest to tzw. ognisko zniszczenia. Przy tym w zależności od rodzaju stanu naprężenia wytworzonego w próbkach efekt skali jest różny. Najbardziej podatne na zniszczenie jest wtedy drewno pracujące na rozciąganie i zginanie (w strefie rozciąganej). Przy ścisaniu wpływ ogniska zniszczenia polegającego na pokrywaniu się osłabiającej drewno niejednorodności i największego naprężenia jest znacznie mniejszy; w przypadku ściskania

poprzecznego na kierunku promieniowym wada taka jak sęk może nawet zwiększyć wytrzymałość drewna.

5. Badania wytrzymałości drewna na zginanie w poprzek włókien należy dokonywać przy obciążeniu belki drewna naporami ustawionymi symetrycznie w odległości  $L/4$  lub  $L/3$  (prześwitu  $L$  belki), tak by zaistniała szansa objęcia największymi naprężeniami rozciągającymi większą część prześwitu co zwiększałoby prawdopodobieństwo wystąpienia najsłabszego ogniwa w tej strefie. Przy sile poprzecznej od jednej, środkowo umieszczonej naporze tylko 10% belki jest objęte naprężeniami rozciągającymi.
6. Badając wpływ efektu skali na zginanie statyczne drewna należy wyraźnie odróżnić trzy grupy badań: badanie próbek z drewna „czystego”, badanie próbek i wyrobów z drewna z wadami oraz badanie próbek i wyrobów z drewna klejonego. Badania drewna „czystego”, bez widocznych niejednorodności (głównie makronie jednorodności zwanych wadami) mają ograniczony zakres, ze względu na trudności z pozyskaniem próbek do badań. Grubość tych próbek zwiększano do kilkunastu centymetrów, a długość – przy zachowaniu podobieństwa geometrycznego – do 17 razy. Z przestudiowanych prac wynika, że współczynnik skali przy zginaniu próbek czystych zmniejszał się maksymalnie do wartości  $K = 0,78$ . Badania takie przydatne są do celów porównawczych. Badania drewna z wadami przeprowadza się zwykle w celu otrzymania danych do projektowania konstrukcji i wyrobów z drewna. Współczynniki skali w tym przypadku są zwykle większe i osiągają wartości  $0,6 \div 0,7$ . Badania drewna klejonego pozwalają spełnić warunek podobieństwa geometrycznego, warunek jednorodności próbki, a wymiary badanych wyrobów mogą być dowolnie duże (na ile pozwala urządzenie badawcze). Również wyniki i tych badań są przydatne konstruktorom.
7. Wpływ efektu skali na ściskanie wzdłuż włókien jest wyraźnie mniejszy niż przy zginaniu. Współczynnik skali w przypadku próbek z drewna „czystego” przyjmował wartości  $K = 0,02 \div 0,20$ .
8. Na zmniejszanie się wytrzymałości tarcicy na zginanie wpływa głównie zmiana długości prześwitu belki (średni parametr efektu długości



w analizowanych badaniach wynosił  $g_1 = 0,20 \div 0,30$ . Średni parametr efektu wysokości  $g_2$  był znacznie mniejszy  $g_2 = 0 \div 0,08$ . Średni parametr efektu długości przy rozciąganiu tarcicy wynosił  $g = 0,22$ , a przy ściskaniu wzdłuż włókien  $g = 0,10$ . Przy rozciąganiu wpływ szerokości przekroju był nieznaczny ( $g = 0,05$ ), a przy ściskaniu był on znaczny ( $g = 0,35$ ); te ostatnie wyniki dotyczyły badań wstępnych.

9. Obok długości prześwitu belki na efekt skali wpływa również sposób rozłożenia momentu gnącego, wynikający ze sposobu podparcia i obciążenia belki. Rekomendowane jest obciążenie belki swobodnie podparte jednolitym obciążeniem rozłożonym. Przy innym podparciu o obciążeniu stosować należy współczynniki poprawcze, które zmieniają się w granicach od 0,85 (przy stałym momencie gnącym i podparciu przegubowym) do 1,40 (przy utwierdzeniu w obu końcach i obciążeniu jednolitym ciągłym).
10. Wytrzymałość drewna na zginanie, na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien jest najsilniej zależna od gęstości drewna, sękatości i szerokości przyrostów rocznych (współczynniki korelacji  $0,4 \div 0,5$ ). Mniejszy wpływ na wytrzymałość mają pęknięcia, skręt włókien i odchylenia kierunku włókien od krawędzi próbki i kierunku obciążenia (współczynniki korelacji  $\sim 0,2$ ). Tak więc badając efekt skali uwzględnianie tych cech wydaje się być nieodzowne. Badania te są porównywalne tylko w przypadku próbek z tarcicy z tej samej klasy wytrzymałości.
11. W porównaniu z drewnem bezsęcznym wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien drewna sosnowego mało sękatego może być mniejsza o 50%, a drewna bardzo sękatego – o 85%. Podobnie rzecz się ma w przypadku zginania gdy sęk znajduje się w strefie rozciąganej i na odcinku najbardziej naprężonym; co stwarza warunki do powstania ogniska zniszczenia. Oprócz położenia sęka duże znaczenie mają jego względne wymiary, charakteryzowane stosunkiem grubości sęka  $g$  do szerokości  $b$  próbki. Przy względnie małych sękach ( $g/b = 0,05$ ) wytrzymałość w porównaniu z drewnem bezsęcznym zmniejsza się nieznacznie – o  $7 \div 10\%$ . Przy względnie grubych sękach ( $g/b = 0,50$ ) zmniejszenie wytrzymałości wynosić może 50%.

### 3. Cel i zakres pracy

W pracy podjęto próbę oszacowania efektu skali w doraźnej wytrzymałości drewna. Pod terminem „efekt skali” (size effect, masztabnyj faktor) w doświadczeniach wytrzymałościowych rozumie się liczbowe wyrażenie wpływu wymiarów próbki lub rzeczywistego elementu konstrukcyjnego na średnią wytrzymałość lub średnią sprężystość (stałe sprężyste) drewna, w postaci ilorazu wytrzymałości (lub modułu sprężystości) stwierdzonych dla badanej próbki do wytrzymałości stwierdzonych przy badaniu małych próbek, stanowiących punkt odniesienia. W zależności od celu badań są to albo małe, znormalizowane próbki (o przekroju poprzecznym 20x20 mm lub 50x50 mm) z tzw. „drewna czystego” albo próbki drewna tartacznego o minimalnych wymiarach przekroju 38x38 mm. Małe próbki z drewna czystego powinny cechować się:

- największą jednorodnością (dla danego gatunku),
- najbardziej prawidłowym ułożeniem słoików rocznych,
- największą gwarancją braku wad w próbce,
- pokrywaniem się orientacji próbki z kierunkami anizotropii drewna.

Z uwagi na efekt skali dotyczący tarcicy i jej wytrzymałościowego sortowania za standaryzowaną wielkość elementów tarcicy, do wytrzymałości których odnosi się wytrzymałość większych elementów, przyjmowane są wspomniane wyżej elementy o przekroju 38x38 mm, przy zginaniu o długości 1 m. Warunek czystości drewna dla elementów tartacznych zwykle nie jest możliwy do uzyskania i nie jest wymagany.

Pracę ograniczono do badania próbek z drewna sosnowego na zwykle badane, podstawowe testy wytrzymałościowe: doraźne ścisnienie wzdłuż włókien oraz doraźne zginanie statyczne. Cel pracy realizowano w oparciu o analizę wpływu następujących wybranych czynników:

- niejednorodności drewna,
- orientacji próbki względem kierunków anizotropii drewna,
- naturalnych wad drewna (głównie sękatości).

Zaznaczyć należy, że drewniane elementy najczęściej narażone są na długotrwałe obciążenia dynamiczne. Stąd też do obliczeń wytrzymałościowych tych elementów niezbędna jest znajomość wytrzymałości zmęczeniowej drewna, oszacowywana podczas długotrwałych badań wymagających zaangażowania całych zespołów badaczy. Autor pracy, nie był w stanie takich badań dokonać. Zakładał przy tym, że efekty skali przy badaniach doraźnych i zmęczeniowych są jednakowe.

#### **4. Hipoteza badawcza**

Do realizacji celu pracy przyjęto hipotezę badawczą opartą na przesłankach wynikających z technicznej struktury drewna, mechanice zniszczenia drewna pod wpływem obciążeń i wpływie wad drewna wynikających z naturalnej jego budowy i istoty wzrostu drzew.

**Istnieje możliwość przedstawienia efektu skali wynikającego z niejednorodności struktury drewna na podstawie analizy statystycznej wyników badań wytrzymałościowych.**

**Oczekuje się korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami wpływającymi na wytrzymałość drewna.**

## 5. Metodyka badań

### 5.1. Pozyskanie materiału do badań

Wzrost wszechstronnej użyteczności lasu wymaga wykorzystania możliwości produkcyjnych środowiska przyrodniczego, jak również umiejętnego kierowania złożonymi procesami naturalnymi, przebiegającymi w tym środowisku. Technika produkcji w leśnictwie polega na wykorzystaniu i celowym kierowaniu przebiegiem wzrostu roślin, w wyniku którego wytwarzana jest przede wszystkim substancja drzewna odkładana corocznie w postaci płaszcza przyrostowego drewna.

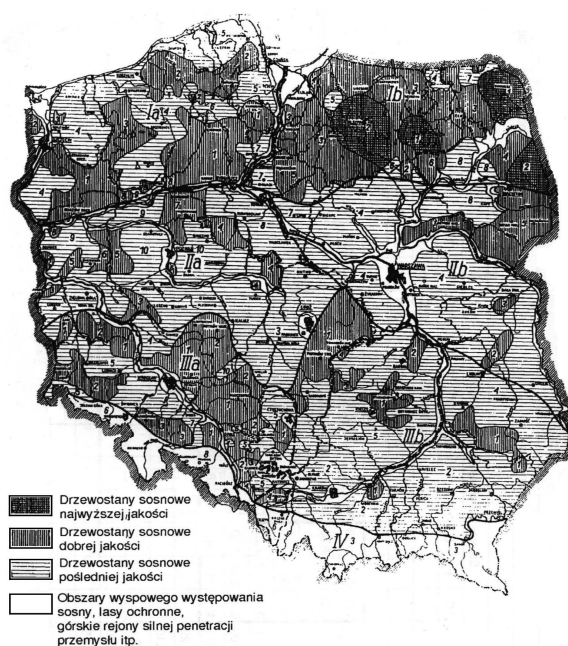
We współczesnym gospodarstwie leśnym zwraca się szczególną uwagę na zachowanie trwałości lasu, czyli stabilności odnawialnych, naturalnych zasobów leśnych. Wymaga to gospodarowania opartego na dokładnym poznaniu przyrodniczych warunków życia lasu, a zarazem produkcji drewna. W tym celu opracowano i wdrożono regionalizację przyrodniczo – leśną, której zadaniem jest przedstawienie w sposób uporządkowany, zróżnicowania środowiska przyrodniczego, tworzącego warunki wzrostu i rozwoju roślinności leśnej. W regionalizacji przyrodniczo – leśnej obowiązującej w Polsce [Tramplera i in. 1990] wyróżniono podział na osiem krain: I Bałtycką, II Mazursko – Podlaską, III Wielkopolsko – Pomorską, IV Mazowiecko – Podlaską, V Śląską, VI Małopolską, VII Sudecką i VIII Karpacką (rys.37).



Rys. 37. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski [Tramplera i in. 1990]

Podział ten sprawdził się w praktyce, ułatwiając prowadzenie gospodarki leśnej zgodnie z przyrodniczym charakterem regionu. Umożliwił on ponadto opracowania typologiczne obiektów, które wymagają zlokalizowania rozpatrywanych obszarów w odpowiednim regionie przyrodniczo – leśnym, aby w ten sposób określić geologiczno-glebowe i klimatyczne warunki, kształtujące strukturę siedlisk i składy gatunkowe drzewostanów [SPHL 2004].

Usystematyzowanie występowania poszczególnych siedlisk leśnych, zastosowanie na nich właściwych składów gatunkowych drzewostanów oraz dobór odpowiednich zabiegów z zakresu gospodarki leśnej przyczyniło się do wyodrębnienia ekotypów wielu gatunków roślin. Zjawisko to jest bardzo istotne z punktu widzenia praktycznego zastosowania drewna ponieważ stwarza naturalny podział surowca w kontekście jego użyteczności w poszczególnych zastosowaniach. Na tej podstawie, po dokładnej analizie jakości drewna okrągłego ze wszystkich nadleśnictw w Polsce, dokonano klasyfikacji jakościowej tartacznego drewna sosnowego w zależności od jego pochodzenia. Biorąc pod uwagę częstość występowania regionów o dobrej jakości drewna sosnowego zaproponowano podział naszego kraju na cztery obszary: I Północny Pas Sosny Pojezierskiej, II Środkowy Pas Sosny Nizinnej, III Południowy Pas Sosny Wyżynnej i IV Górski Pas Wyspowego Występowania [Dziewanowski 1967] (rys. 38).



Rys. 38. Zarys rejonizacji jakościowej drewna sosnowego w Polsce według R. Dziewanowskiego [Kubiak, Laurow 1994]

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest drewno sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*), pozyskane z drzewostanów w Nadleśnictwach: Brzeg, Turawa i Kup, które znajdują się w V Krainie Śląskiej, Dzielnicy: Równina Opolska i Mezuregionie: Bory Stobrawskie. Zgodnie z rejonizacją jakościową drewna sosnowego w Polsce, należą one do III Południowego Pasa Sosny Wyżynnej i charakteryzują się dobrą jakością drewna.



Fot. 1. Dłuzyce sosnowe w mygłe na składnicy przyrzębowej (fot. Łapka)

W celu wykonania badań, zgodnie z dominującą w Polsce strukturą jakościową wielkowymiarowego drewna sosnowego, pozyskano dłużyce sosnowe o miąższości 20 m<sup>3</sup> w klasach jakościowo – wymiarowych: WA (10%), WB (20%) i WC (70%) [Szczepaniak, Spława – Neyman 2000]. Miąższość dłużyc (fot. 1) przyjęto według specyfikacji przygotowanych przez leśniczych sprzedających drewno.

Dłużyce przewieziono do tartaku, w którym wymanipulowano kłody (fot. 2), a ich miąższość obliczono zgodnie z normą PN-93/D-95000. Czoła dłużyc, a następnie kłód oznakowano tak aby po przetarciu możliwe było ustalenie z jakiej klasy kłody pochodzi określona deska. Kłody przetarto



na traku pionowym (fot. 3) w technologii z pryzmowaniem, przy założeniu rozpiłowywania rdzenia.



Fot. 2. Kłody sosnowe w tartaku (fot. Łapka)



Fot. 3. Przecieranie kłody na traku pionowym (fot. Każak)

Według specyfikacji przygotowanej przez tartak wykonujący usługę przetarto 5 m<sup>3</sup> tarcicy konstrukcyjnej (fot. 4). Miąższość uzyskanego materiału oznaczano metodą stereometryczną zgodnie z normą: PN-78/D-03001.



Fot. 4. Tarcica konstrukcyjna strugana czterostronnie (fot. Łapka)

## 5.2. Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy metodą wizualną

Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy metodą wizualną polega na zakwalifikowaniu jej do określonej klasy sortowniczej na podstawie występujących w niej wad budowy drewna, wad kształtu i wad obróbki zgodnie z normą PN-82/D-94021. Iglastą tarcicę konstrukcyjną dzieli się na trzy klasy jakości:

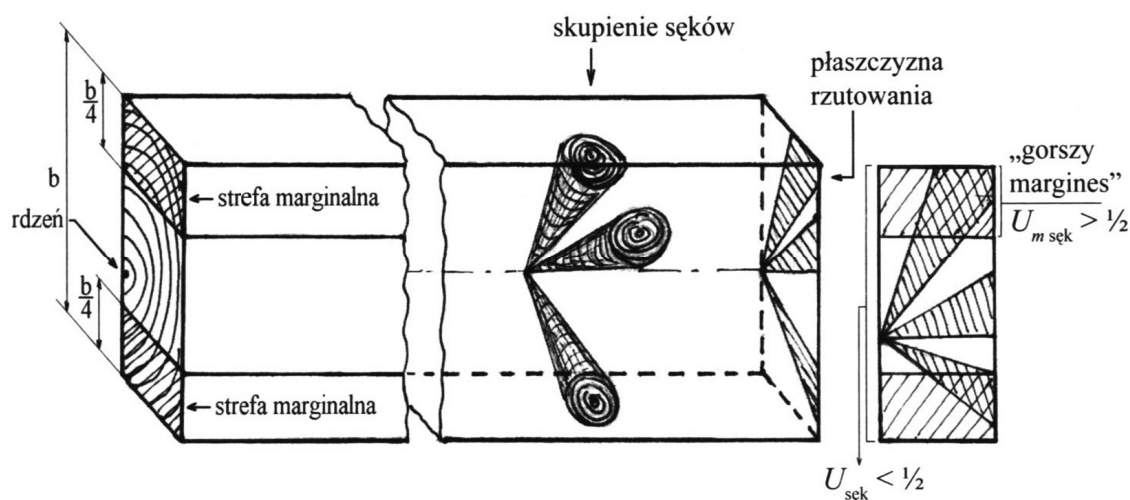
- KW – klasa wyborowa,
- KS – klasa średniej jakości,
- KG – klasa gorszej jakości.

Klasyfikacja wizualna polega na odnalezieniu w każdej sztuce tarcicy najłabszego przekroju – najczęściej jest to przekrój w którym występuje największe nagromadzenie wad. Wytrzymałość tego najłabszego przekroju będzie decydowała o wytrzymałości całej sztuki tarcicy. Oceniając najłabszy przekrój, oceniamy tym samym tarcicę na całej jej długości, nadając odpowiednią klasę lub traktujemy jako odrzut – sztukę pozaklasową nie nadającą się do celów konstrukcyjnych. Przy sortowaniu pod uwagę brane są następujące wady budowy drewna: sęki, skręt włókien, pęknięcia, słoistość, pęcherze żywiczne, zakorki zabitki, zgnilizna i chodniki owadzie (tabela 17)



oraz wady obróbki i kształtu: obliny, krzywizny, wichrowatość (tabela 18), falisty rżaz, rysy, nieprostokątność płaszczyzn i boków oraz nieprostokątność czoł. Związane z tymi wadami niedokładności wymiarowe opisuje dokładnie norma PN-75/D-96000 [Dzbeński i in. 2005].

Najważniejszym kryterium, najczęściej decydującym o klasie tarcicy są sęki, to znaczy ich wielkość i położenie na przekroju poprzecznym sortowanej sztuki tarcicy.



Rys. 39. Zasada rzutowania sęków przy ustalaniu sękatości tarcicy [Dzbeński i in. 2005]

Norma PN-82/D-94021 wprowadza dwa parametry określające sękatność sztuki tarcicy:

- $U_{sęk}$  – ogólny wskaźnik sękatości, czyli stosunek powierzchni sęka (sęków) do powierzchni całego przekroju poprzecznego tarcicy (rys. 39),
- $U_{m sęk}$  – wskaźnik sękatości strefy marginalnej, czyli stosunek powierzchni sęka w tak zwanym gorszym marginesie do powierzchni tego marginesu (marginesy to skrajne strefy każdej sztuki tarcicy o szerokości równej 1/4 szerokości deski) (rys. 39).

Osoba uprawniona do klasyfikowania tarcicy wyszukuje na całej długości deski najłagodniejszy przekrój, czyli taki, w którym znajduje się największy sęk lub największe skupisko sęków. Następnie ustala dla tego przekroju wartość współczynnika  $U_{sęk}$  i  $U_{m sęk}$ . Do oceny wybiera się zawsze margines „gorszy” czyli ten, którego sęki zajmują większą powierzchnię na przekroju poprzecznym (rys. 39).

Drugą, bardzo ważną wadą drewna, która musi być uwzględniona podczas sortowania wytrzymałościowego jest skręt włókien. Został on w różnym stopniu dopuszczony w tarcicy konstrukcyjnej [Krzosek 2009].

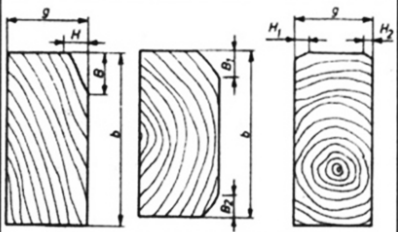
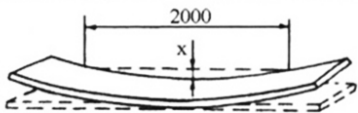
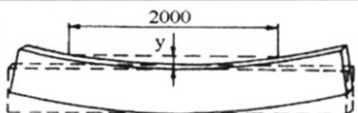
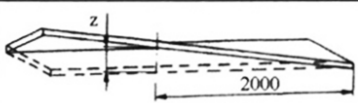
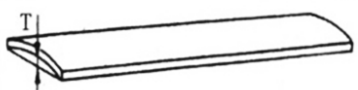
Tabela 17. Zestawienie wad strukturalnych drewna dopuszczonych z ograniczeniem w iglastej tarcicy konstrukcyjnej według PN-82/D-94021

Kryterium klasyfikacji	Wymagania w zależności od klasy jakości tarcicy			Sposób pomiaru
	KW	KS	KG	
Sęki, bez względu na jakość, wyrażone wskaźnikiem sękatości: a) w strefie marginalnej $U_{m\ s\ sek}$ b) na całym przekroju $U_{s\ sek}$	$\leq 1/4$	$\leq 1/4$ $\leq 1/2$	$\leq 1/2$ $> 1/2$	
Skręt włókien	$\leq 7\%$ (1 : 14)	$\leq 10\%$ (1 : 10)	$\leq 15\%$ (1 : 6)	
Pęknięcia, pęcherze żywiczne, zakorki i zabitki: a) nieprzechodzące na czoła, boki i przeciwległą płaszczyznę b) czołowe nieprzechodzące, przechodzące i okrężne	nie bierze się pod uwagę wad o długości poniżej 300 mm, dopuszczalne o długości do 1/4 długości sztuki i nie większe niż			
	600 mm		900 mm	
	o głębokości do 1/3 grubości sztuki	o głębokości do 1/2 grubości sztuki	o głębokości do 2/3 grubości sztuki	
	dopuszczalne o długości mniejszej od szerokości sztuki		dopuszczalne o długości do 1,5 szerokości sztuki	
Zgnilizna	niedopuszczalna		dopuszczalne ślady zgnilizny twardej	
Chodniki owadzie	niedopuszczalne		dopuszczalne występujące sporadycznie	
Przeciętna szerokość słoików (nie bierze się pod uwagę, gdy gęstość drewna powietrznosuchego sosny jest powyżej $450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a świerka powyżej $420\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	4 mm	6 mm	10 mm	

Wyprodukowaną tarcicę, pochodzącą z Krainy V Śląskiej poddano klasyfikacji wytrzymałościowej metodą wizualną zgodnie z normą: PN-82/D-94021. Łącznie sklasyfikowano 206 sztuk czterostronnie struganych

i suszonych komorowo desek o wymiarach nominalnych: 38x140x5000 mm, z czego: 52 sztuki (25%) zakwalifikowano do klasy KW, 48 sztuk (23%) do klasy KS i 76 sztuk (37%) do klasy KG. Ze względu na zbyt duże wartości wskaźników sękatości 30 sztuk tarcicy (15%) zakwalifikowano jako odrzut.

Tabela 18. Zestawienie wad kształtu i obróbki drewna dopuszczonych z ograniczeniem w iglastej tarcicy konstrukcyjnej według PN-82/D-94021

Kryterium klasyfikacji	Wymagania w zależności od klasy jakości tarcicy			Sposób pomiaru
	KW	KS	KG	
Oblina	na całej długości dwóch krawędzi jednej płaszczyzny, zajmująca łącznie nie więcej niż 1/4 grubości i 1/4 szerokości		a) w odległości do 300 mm od czół do 1/3 grubości i 1/3 szerokości b) w odległości powyżej 300 mm od czół do 1/2 grubości i 1/3 szerokości sztuki	
Krzywizna podłużna płaszczyzn	30 mm – w tarcicy o grubości do 38 mm, 10 mm – w tarcicy o grubości powyżej 75 mm			
Krzywizna podłużna boków	10 mm – w tarcicy o szerokości do 75 mm 5 mm – w tarcicy o szerokości powyżej 250 mm			
Wichrowatość	6% szerokości sztuki			
Krzywizna poprzeczna	4% szerokości sztuki			

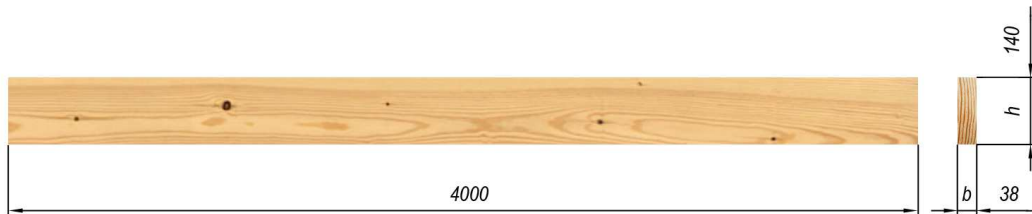
### 5.3. Charakterystyka materiału badawczego

W wyniku przeprowadzonej klasyfikacji tarcicy metodą wizualną, wydzielono z niej trzy klasy sortownicze, z których do dalszych badań przyjęto klasę wyborową drewna (KW) o najwyższych walorach użytkowych. Z tarcicy tej klasy pozyskano ponadto materiał badawczy o mniejszych wymiarach, w taki sposób aby nie wpłynąć na zmianę klasy sortowniczej danej sztuki.

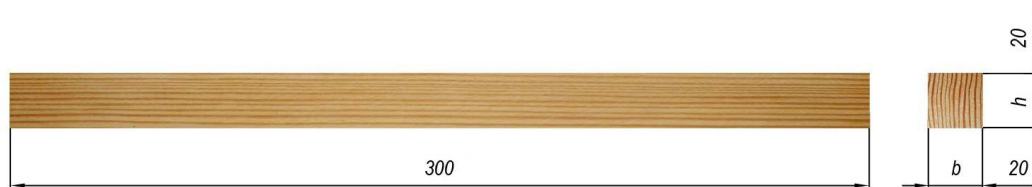
W wyniku procesu strugania czterostronnego uzyskano cztery grupy prób drewna: A (rys. 40), B (rys. 41), C (rys. 42) i D (rys. 43) – po 40 sztuk próbek w każdej grupie, na których przeprowadzono badania wytrzymałościowe. Próbki grup B, C i D były pozbawione wad i posiadały równomierny przebieg

przyrostów rocznych na przekroju poprzecznym.

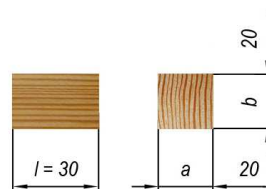
Próbki drewna przed wykonaniem badań wytrzymałościowych poddano procesowi klimatyzowania do osiągnięcia poziomu wilgotności  $12 \pm 3\%$ . Tarcicę (grupa A) przechowywano w pomieszczeniu z kontrolowaną temperaturą i wilgotnością, którą oznaczano za pomocą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego (metoda elektrometryczna) wg normy PN-EN 13183-2:2004. Próbki z grup B, C i D przechowywano w komorze klimatycznej (fot. 5). Po klimatyzowaniu, dokonano pomiaru przekroju poprzecznego próbek oraz uch długości wzdłuż odpowiednich osi symetrii z dokładnością do 1 mm. Ponadto oznaczono masę próbek wszystkich grup z dokładnością do 0,01 g.



Rys. 40. Wymiary tarcicy sosnowej (wg PN-EN 408:2004) przeznaczanej do określania modułu sprężystości przy zginaniu statycznym i badania wytrzymałości na zginanie statyczne, gdzie:  $b$  – przekrój w kierunku promieniowym,  $h$  – przekrój w kierunku stycznym



Rys. 41. Wymiary próbki drewna sosny (wg PN-63/D-04117 i PN-77/D-04103) przeznaczanej do określania modułu sprężystości przy zginaniu statycznym i badania wytrzymałości na zginanie statyczne, gdzie:  $b$  – przekrój w kierunku promieniowym,  $h$  – przekrój w kierunku stycznym



Rys. 42. Wymiary próbki drewna sosny (wg PN-79/D-04102) przeznaczanej do badania wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, gdzie:  $l$  – długość próbki,  $a$  – przekrój w kierunku promieniowym,  $b$  – przekrój w kierunku stycznym



Rys. 43. Wymiary próbki drewna sosny przeznaczonej do badania wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, gdzie:  $l$  – długość próbki,  $a$  – przekrój w kierunku promieniowym,  $b$  – przekrój w kierunku stycznym



Fot. 5. Komora suszarnicza i klimatyczna – wykorzystywane w procesie klimatyzowania próbek z drewna przed badaniami wytrzymałościowymi, przy kontrolowanej temperaturze i wilgotności (fot. Łapka)

#### 5.4. Oznaczanie wilgotności drewna

Wilgotność drewna z wszystkich grup oznaczono metodą suszarkowo-wagową według PN-EN 13183-1:2004 po przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych. W tym celu z każdej sztuki tarcicy (grupa A) pobrano wyrzynek obejmujący przekrój poprzeczny badanej tarcicy (38x140 mm) i długość wzdłuż włókien 20 mm, który był pozbawiony wad i znajdował się najbliżej miejsca zniszczenia. Próbki z grup B, C, D, poddano oznaczeniu wilgotności w całości.

Próbki drewna ważono z dokładnością do 0,01 g po wykonaniu badań

wytrzymałościowych, a w przypadku tarcicy zaraz po pobraniu wyrzynka. Następnie klimatyzowano je w komorze przeznaczonej do suszenia drewna (fot. 5) posiadającej wewnętrzny swobodny obieg powietrza w temperaturze  $103 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ . Proces suszenia trwał do chwili, gdy różnica między dwoma kolejnymi ważeniami, które wykonywano w dwugodzinnych odstępach, była mniejsza niż 0,1%. Próbki ważono natychmiast po wyjęciu z suszarki.

Wilgotność  $\omega$  obliczono jako procent masy, według wzoru:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100\%, \quad (40)$$

gdzie:

$m_1$  – masa próbki przed suszeniem [g];

$m_0$  – masa wysuszonej próbki [g];

$\omega$  – wilgotność [%].

### 5.5. Oznaczanie gęstości drewna

Gęstość drewna wszystkich prób oznaczono metodą stereometryczną według PN-77/D-04101. Po klimatyzowaniu i przed badaniami wytrzymałościowymi dokonano pomiaru próbek z grup B, C, D wzdłuż odpowiednich osi symetrii z dokładnością do 0,1 mm oraz oznaczono ich masę z dokładnością do 0,01 g. Gęstość tarcicy (grupa A) oznaczono na podstawie wymiarów i masy wyrzynków, które pobrano po wykonaniu badań wytrzymałościowych w celu oznaczenia wilgotności.

Gęstość drewna o wilgotności  $W$  ( $\rho_W$ ) obliczono z dokładnością do  $5 \text{ kg/m}^3$  według wzoru:

$$\rho_W = \frac{m_W}{a_W b_W l_W} = \frac{m_W}{V_W}, \quad (41)$$

gdzie:

$m_W$  – masa próbki [kg] o wilgotności  $W$ ;

$a_W, b_W, l_W$  – wymiary liniowe przekroju poprzecznego i długości próbki [m] o wilgotności  $W$ ;

$V_W$  – objętość próbki [ $\text{m}^3$ ] o wilgotności  $W$ .

Do celów porównawczych stosowanych w analizie wyników badań przeliczono wartość gęstości próbek drewna o wilgotności  $W$  ( $\rho_W$ ) na wartość gęstości drewna przy wilgotności 12% ( $\rho_{12}$ ). Wartość wilgotności próbek drewna zawarta była w przedziale  $9\% \leq W \leq 15\%$  zatem przeliczenia dokonano według wzoru:

$$\rho_{12} = \rho_W \left[ 1 - \frac{(1 - K_\beta)(W - 12)}{100} \right], \quad (42)$$

gdzie:

$\rho_W$  – wartość gęstości próbki drewna w chwili badania;

$K_\beta$  – współczynnik skurczu objętościowego – jeżeli gęstość wyrażona jest w  $\text{kg/m}^3$  przyjmuje się wartość współczynnika jako równą  $0,85 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_W$ ;

$W$  – wilgotność drewna próbki w chwili badania oznaczona metodą suszarkowo – wagową [%].

## 5.6. Charakterystyka stanowiska badawczego

Badania drewna przeprowadzono w laboratorium akredytowanym na certyfikowanym stanowisku pomiarowym.



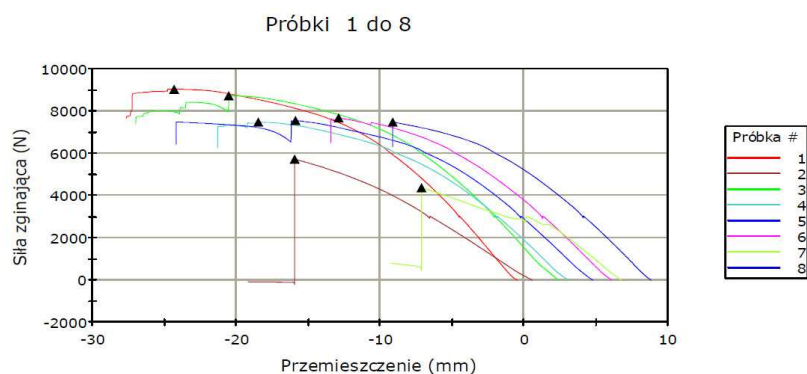
Rys. 44. Elementy systemu do badań wytrzymałościowych INSTRON – stanowisko do badań wytrzymałościowych wraz z oprogramowaniem Bluehill 2

Stanowisko pomiarowe to uniwersalny zaawansowany system do badań wytrzymałościowych INSTRON (rys. 44), w zestaw którego wchodzi:

- urządzenie do badań wytrzymałościowych (fot. 6),
- cyfrowy system sterujący,
- interfejs szybkiej transmisji danych,
- głowica pomiarowa 100 kN z wymiennym osprzętem,
- zestaw komputerowy PC zintegrowany z systemem INSTRON,
- oprogramowanie Bluehill 2 (rys. 45).

Drewno sosnowe poddano badaniom wytrzymałościowym określając dla właściwych grup prób odpowiednio:

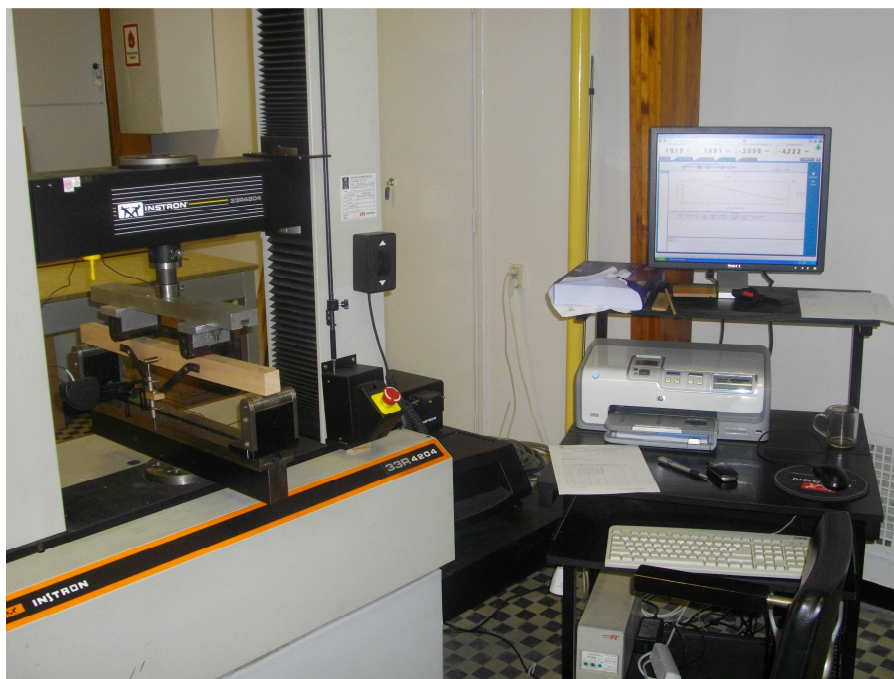
- moduł sprężystości przy zginaniu statycznym według PN-EN 408:2004 – grupa A i według PN-63/D-04117 – grupa B,
- oznaczenie wytrzymałości na zginanie statyczne według PN-EN 408:2004 – grupa A i według PN-77/D-04103 – grupa B,
- oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien według PN-79/D-04102 – grupa C i D.



	Grubość (mm)	Szerokość (mm)	Czas (sec)	Siła zginająca (N)	Przemieszczenie (mm)	Wydłużenie przy zginaniu (mm)	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	Moduł (moduł-E) (MPa)
1	38,12	32,34	208	9031	-24,28	20,22	98,58	16135
2	38,10	32,24	245	5708	-17,29	10,17	62,57	13562
3	37,94	32,46	209	8730	-23,21	18,90	95,85	15541
4	37,96	32,46	223	7485	-22,52	17,01	82,09	14270
5	37,81	32,28	232	7562	-21,30	15,83	84,06	15084
6	37,86	32,47	239	7682	-19,63	14,72	84,68	13970
7	37,78	31,62	188	4364	-15,25	7,79	49,61	114583
8	37,81	32,38	190	7482	-18,60	13,73	82,92	14700
Średnia Odchy. stand.	37,92	32,28	217	7255	-20,26	14,80	80,04	27231
	0,132	0,281	21,495	1533,379	3,119	4,206	16,367	35305,652

Rys. 45. Przykład wyniku przetworzenia danych z głowicy pomiarowej INSTRON i wyświetlenia w formie graficznej oraz tabelarycznej przez oprogramowanie Bluehill 2





Fot. 6. INSTRON 4204 podczas badań wytrzymałości na zginanie statyczne – siłownik i głowica z wymiennymi uchwytami zintegrowane z system PC (fot. Łapka)

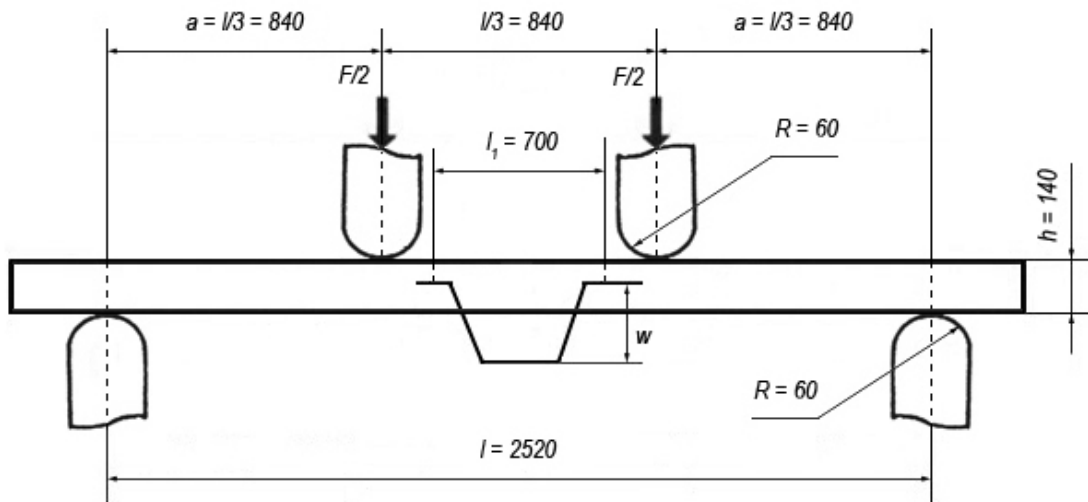
### 5.7. Oznaczanie modułu sprężystości przy zginaniu statycznym

Wartość modułu sprężystości próbek grupy A określono przy obciążaniu ich dwoma siłami, symetrycznie w dwóch punktach przy rozpiętości 18 razy większej od wysokości przekroju poprzecznego. Odległość między podporami oraz między podporami i podporami była równa sześciu wysokościami przekroju poprzecznego próbki (rys. 46). Próbkę obciążano w strefie czystego zginania, prostopadle do ich powierzchni w przedziale proporcjonalności zależności obciążenie – ugięcie (rys. 47).

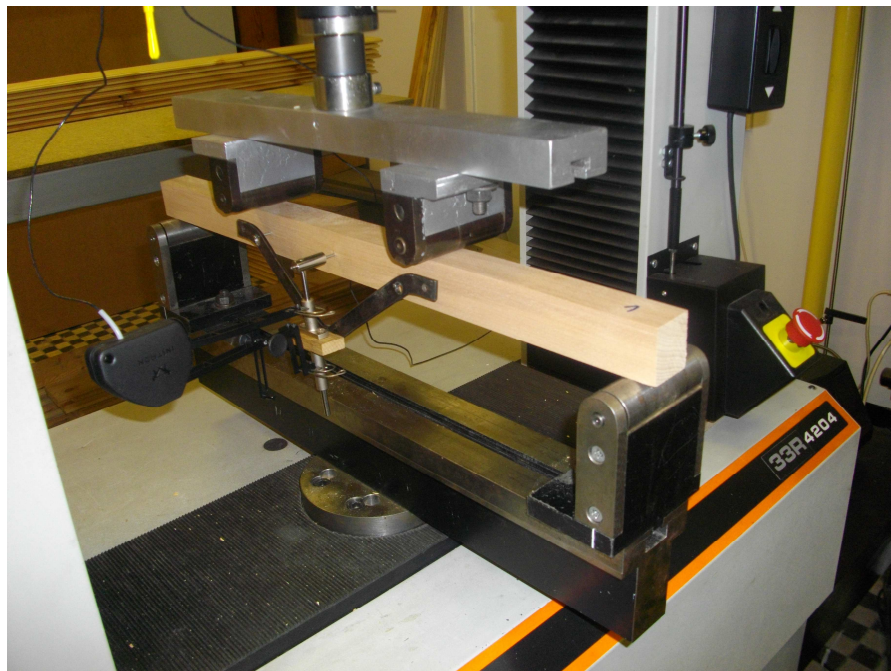
Próbki były swobodnie podparte, między próbkami oraz podporami i podporami zastosowano stalowe płytki, jako podkładki, aby zminimalizować powstawanie miejscowych wgnieceń podczas badania. Dodatkowo zastosowano boczne prowadnice w celu zabezpieczenia próbek przed wyboczeniem w trakcie badań.

Obciążenie próbek ( $F$ ) w trakcie trwania badania było przykładane ze stałą prędkością 8 mm/min. Ugięcie ( $w$ ) mierzono od osi obojętnej na obydwu bocznych płaszczyznach próbki, w środku centralnie umieszczonej bazy pomiarowej czujnika, której długość była równa pięciokrotnej wysokości

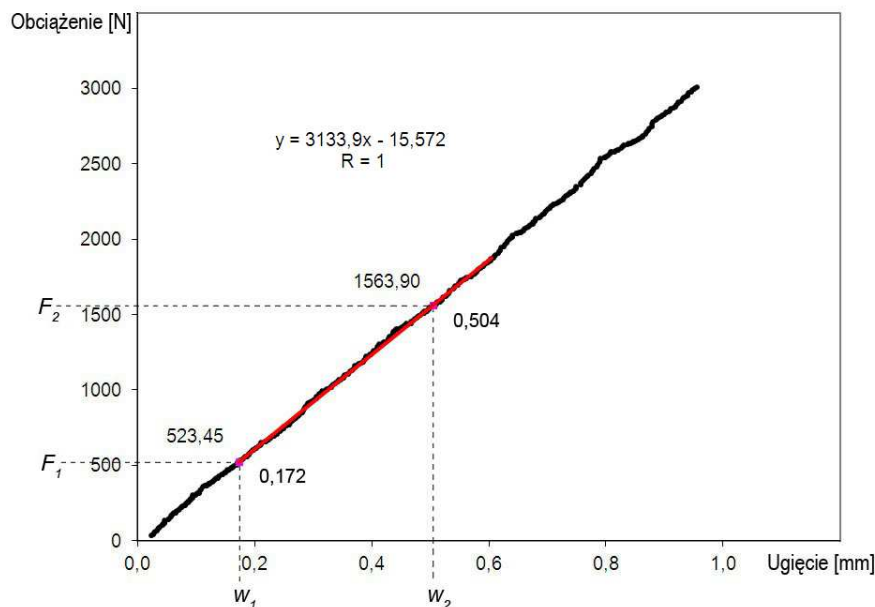
przekroju poprzecznego badanej próbki – przykład na fotografii 7.



Rys. 46. Schemat obciążania prób (tarcicy) grupy A ( metoda czteropunktowa), podczas oznaczania modułu sprężystości przy zginaniu statycznym i wytrzymałości na zginanie statyczne, gdzie:  $a$  – odległość miejsca przyłożenia siły od najbliższej podpory [mm],  $F/2$  – rozstaw napór i kierunek obciążania,  $h$  – wymiar większego boku przekroju tarcicy [mm],  $w$  – przemieszczenie,  $l$  – rozpiętość próbki mierzona między podporami [mm],  $l_1$  – długość pomiarowa próbki [mm],  $R$  – promień zaokrąglenia podpór i napór [mm]



Fot. 7. Przykład oznaczania modułu sprężystości – charakterystyczny osprzęt głowicy obciążającej wraz z sondą pomiarową (fot. Noskowiak)



Rys. 47. Wykres przedstawiający zależność między obciążeniem ( $F$ ) i ugięciem ( $w$ ) w zakresie odkształceń sprężystych

Na podstawie otrzymanych wyników badań dla każdej próbki sporządzono wykres przedstawiający zależność między obciążeniem i ugięciem (rys. 47). Odcinek wykresu odpowiadający przedziałowi obciążenia od  $0,1 F_{max}$  do  $0,4 F_{max}$  wykorzystano do analizy regresji. Dla każdego wykresu określano najdłuższą część tego odcinka, która odpowiadała współczynnikowi korelacji równemu co najmniej 0,99. W przypadku kiedy wymieniona część odcinka zawierała przedział obciążenia równy co najmniej zakresowi od  $0,2 F_{max}$  do  $0,3 F_{max}$ , to do obliczeń modułu sprężystości drewna próbek grupy A zastosowano wzór:

$$E_{m,l(A)} = \frac{(F_2 - F_1)0,75al_1^2}{(w_2 - w_1)bh^3}, \quad (43)$$

gdzie:

$F_2 - F_1$  – przyrost obciążenia odpowiadający odcinkowi linii regresji o współczynniku korelacji równym co najmniej 0,99 [N] (rys. 47);

$a$  – odległość miejsca przyłożenia siły od najbliższej podpory [mm];

$l_1$  – długość pomiarowa próbki [mm];

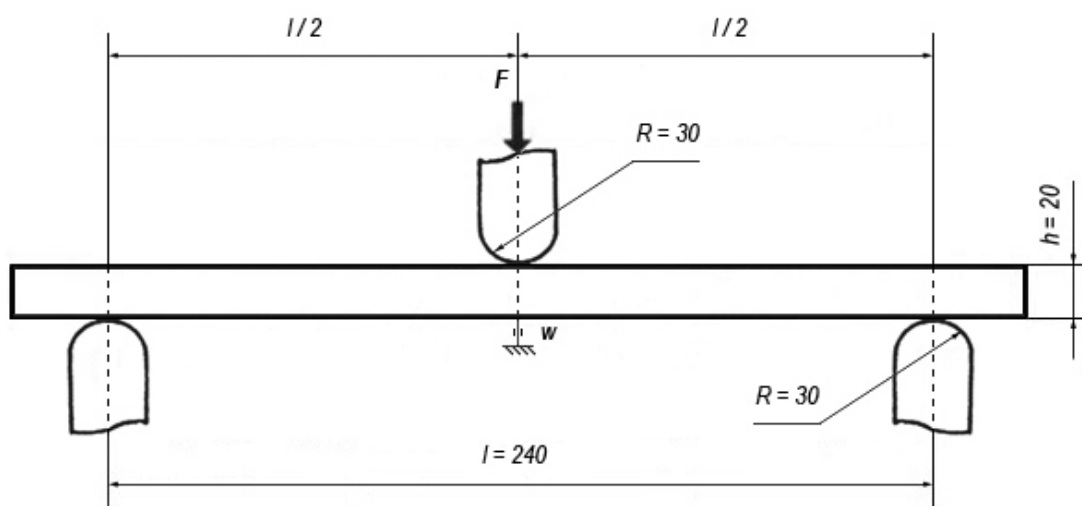
$w_2 - w_1$  – przyrost ugięcia odpowiadający przyrostowi obciążenia [mm] (rys. 47);

$b$  – szerokość próbki [mm];

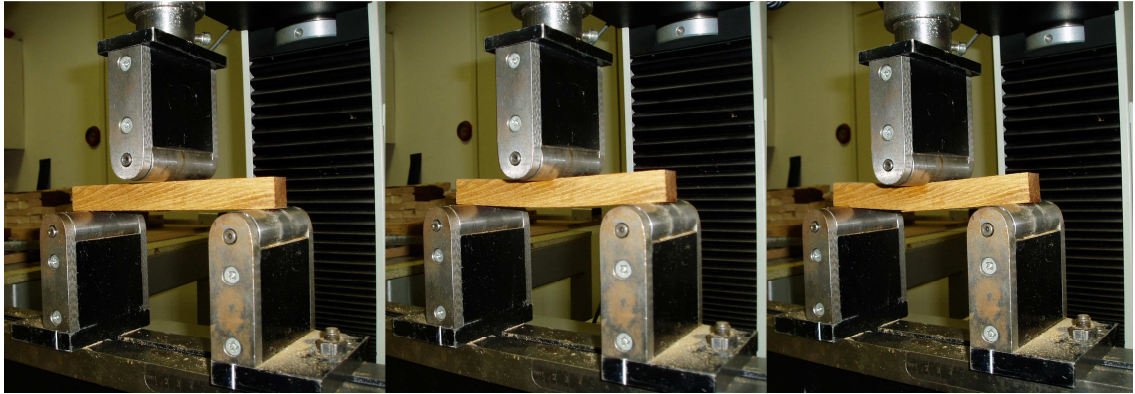
$h$  – wysokość próbki [mm].

Oznaczenie modułu sprężystości próbek grupy B przeprowadzono przy działaniu jednej siły skupionej w kierunku prostopadłym do przekroju promieniowego drewna (fot. 8). Próbki umieszczano swobodnie, symetrycznie na dwóch podporach w sposób umożliwiający przeniesienie obciążenia przez naporę na próbkę w środku jej długości. Odległość między podporami była 12 razy większa od wysokości próbki. Odległość między naporą i podporą była równa sześciokrotnej wartości wysokości próbki (rys. 48).

Obciążenie próbek ( $F$ ) w trakcie trwania badania było przykładane ze stałą prędkością 8 mm/min. Po zakończeniu badań dla każdej próbki sporządzano wykres przedstawiający zależność między obciążeniem i ugięciem jak na rysunku 47. Wartość ugięcia odczytywano z danych przekazanych przez czujnik głowicy pomiarowej, które zostały zapisane w formie tabelarycznej przez oprogramowanie urządzenia do badań wytrzymałościowych. Analogicznie jak w przypadku próbek grupy A, dla każdego wykresu przeprowadzono analizę regresji odcinka wykresu odpowiadającego przedziałowi obciążenia od  $0,1 F_{max}$  do  $0,4 F_{max}$ . Dla każdego wykresu określano również najdłuższą część tego odcinka, która odpowiadała współczynnikowi korelacji równemu co najmniej 0,99.



Rys. 48. Schemat obciążania próbek grupy B (metoda trzypunktowa), podczas oznaczania modułu sprężystości przy zginaniu statycznym i wytrzymałości na zginanie statyczne, gdzie:  $F$  – kierunek obciążania,  $h$  – wysokość próbki [mm],  $w$  – przemieszczenie,  $l$  – rozpiętość próbki mierzona między podporami [mm],  $R$  – promień zaokrąglenia podpór i napory [mm]



Fot. 8. Przykład oznaczania modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie statyczne metodą trzypunktową (fot. Łapka)

Do obliczeń modułu sprężystości drewna próbek grupy B zastosowano wzór:

$$E_{m,l(B)} = \frac{(F_2 - F_1)l^3}{4(w_2 - w_1)bh^3}, \quad (44)$$

gdzie:

$F_2 - F_1$  – przyrost obciążenia odpowiadający odcinkowi linii regresji o współczynniku korelacji równym co najmniej 0,99 [N] (rys. 47);

$l$  – rozpiętość próbki mierzona między podporami [mm];

$w_2 - w_1$  – przyrost ugięcia odpowiadający przyrostowi obciążenia [mm] (rys. 47);

$b$  – szerokość próbki [mm];

$h$  – wysokość próbki [mm].

Do celów porównawczych stosowanych w analizie wyników badań przeliczono wartość modułu sprężystości przy zginaniu statycznym próbek drewna grup A i B o wilgotności  $W$  ( $E_{m,l}$ ) na wartość miejscowego modułu sprężystości drewna przy zginaniu statycznym przy wilgotności 12% ( $E_{m,l(12)}$ ). Wartość wilgotności próbek drewna zawarta była w przedziale  $9\% \leq W \leq 15\%$  zatem przeliczenia dokonano według wzoru:



$$E_{m,l(12)} = E_{m,l}[1 + \alpha(W - 12)], \quad (45)$$

gdzie:

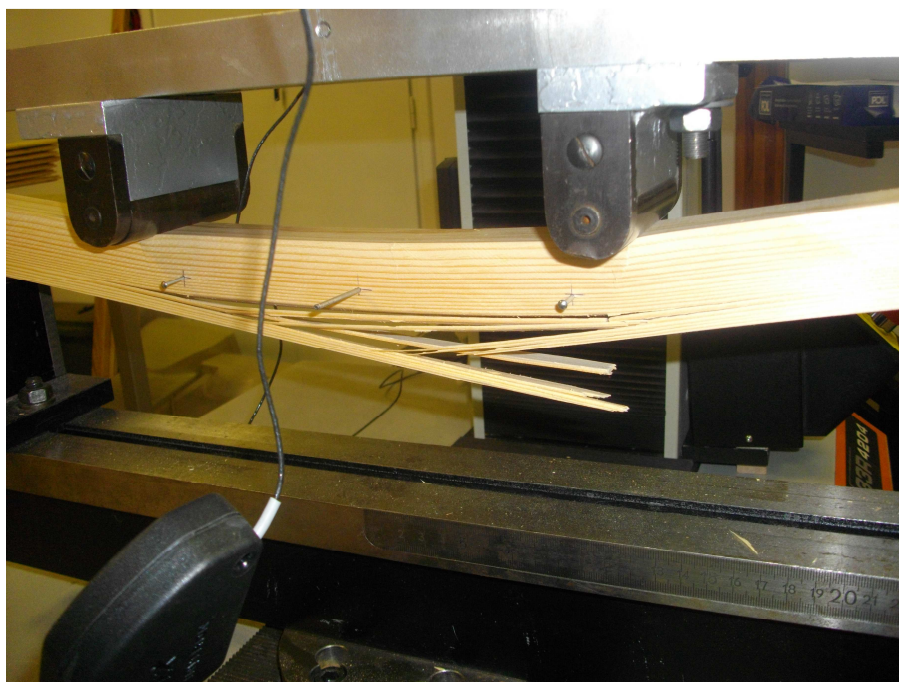
$E_{m,l}$  – wartość modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna (próbek grup A i B) w chwili badania [MPa];

$\alpha$  – współczynnik zmiany modułu sprężystości badanej próbki drewna przy zginaniu statycznym przy zmianie jego wilgotności o 1% ( $\alpha = 0,02$ );

$W$  – wilgotność drewna próbki w chwili badania oznaczona metodą suszarkowo – wagową [%].

### 5.8. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne

Metoda oznaczenia wytrzymałości na zginanie statyczne próbek grupy A (fot. 9) i B (fot. 10) było analogiczne jak w przypadku oznaczenia modułu sprężystości. W przypadku próbek grupy A zastosowano zginanie metodą czteropunktową (rys. 46) natomiast dla próbek grupy B zastosowano metodę przy działaniu jednej siły zginającej (rys. 48). Oznaczanie modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie statyczne odbywało się jednocześnie w przypadku każdej próbki grup A i B.



Fot. 9. Przykład zniszczenia próbki pod wpływem działania maksymalnego obciążenia przy oznaczaniu wytrzymałości na zginanie statyczne metodą czteropunktową (fot. Noskowiak)

Wytrzymałość na zginanie statyczne próbek grupy A o wilgotności  $W$  w chwili badania obliczono ze wzoru:

$$\sigma_{m(A)} = \frac{3aF_{max}}{bh^2}, \quad (46)$$

gdzie:

$a$  – odległość miejsca przyłożenia siły od najbliższej podpory [mm];

$F_{max}$  – obciążenie maksymalne [N];

$b$  – szerokość próbki [mm];

$h$  – wysokość próbki [mm].



Fot. 10. Przykład zniszczenia próbki pod wpływem działania maksymalnego obciążenia przy oznaczaniu wytrzymałości na zginanie statyczne metodą trzypunktową (fot. Łapka)

Wytrzymałość na zginanie statyczne próbek grupy B o wilgotności  $W$  w chwili badania obliczono ze wzoru:

$$\sigma_{m(B)} = \frac{3F_{max}l}{2bh^2}, \quad (47)$$

gdzie:

$F_{max}$  – obciążenie maksymalne [N];

$l$  – rozpiętość próbki mierzona między podporami [mm];

$b$  – szerokość próbki [mm];

$h$  – wysokość próbki [mm].

Do celów porównawczych stosowanych w analizie wyników badań przeliczono wartość wytrzymałości na zginanie statyczne próbek drewna grup A i B o wilgotności  $W$  ( $\sigma_m$ ) na wartość wytrzymałości drewna na zginanie statyczne przy wilgotności 12% ( $\sigma_{m(12)}$ ). Wartość wilgotności próbek drewna zawarta była w przedziale  $9\% \leq W \leq 15\%$  zatem przeliczenia dokonano według wzoru:

$$\sigma_{m(12)} = \sigma_m [1 + \alpha(W - 12)], \quad (48)$$

gdzie:

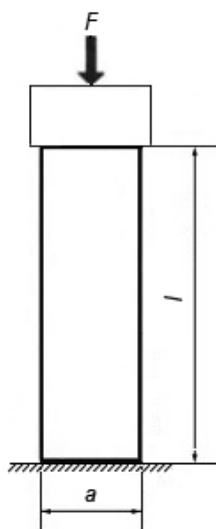
$\sigma_m$  – wartość wytrzymałości na zginanie statyczne próbki drewna (grup A i B) w chwili badania [MPa];

$\alpha$  – współczynnik zmiany wytrzymałości na zginanie statyczne badanej próbki drewna przy zmianie jego wilgotności o 1% ( $\alpha = 0,04$ );

$W$  – wilgotność drewna próbki w chwili badania oznaczona metodą suszarkowo – wagową [%].

### 5.9. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien

Próbki grup C i D w trakcie badań zostały obciążone wzdłuż osi podłużnej z zastosowaniem głowicy umożliwiającej przyłożenie obciążenia ściskającego bez udziału zginania (rys. 49).



Rys. 49. Schemat obciążania próbek grup C i D podczas oznaczania wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, gdzie:  $F$  – kierunek obciążania,  $l$  – długość próbki,  $a$  – szerokość próbki (przekrój w kierunku promieniowym)



Głowica mocująca została zabezpieczona przed odchyleniem się od osi pionowej, tak aby kierunek działania siły ściskającej był równoległy do podłużnej osi próbki (fot. 11).

Próbki obciążano równomiernie ze stałą prędkością dobraną tak aby maksymalną wartość obciążenia osiągnąć w czasie  $90 \pm 30$  s od chwili rozpoczęcia obciążenia.



Fot. 11. Badanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien [fot. Łapka]

Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien próbek grup C i D o wilgotności  $W$  w chwili badania obliczono ze wzoru:

$$\sigma_{c,0} = \frac{F_{max}}{ab}, \quad (49)$$

gdzie:

$F_{max}$  – obciążenie maksymalne [N];

$a$  – wymiar próbki w kierunku promieniowym [mm];

$b$  – wymiar próbki w kierunku stycznym [mm].

Do celów porównawczych stosowanych w analizie wyników badań przeliczono wartość wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien próbek drewna

grup C i D o wilgotności  $W$  ( $\sigma_{c,0}$ ) na wartość wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien przy wilgotności 12% ( $\sigma_{c,0(12)}$ ). Wartość wilgotności badanych próbek drewna zawarta była w przedziale  $9\% \leq W \leq 15\%$  zatem przeliczenia dokonano według wzoru:

$$\sigma_{c,0(12)} = \sigma_{c,0}[1 + \alpha(W - 12)], \quad (50)$$

gdzie:

$\sigma_{c,0}$  – wartość wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien próbki drewna (grup C i D) w chwili badania [MPa];

$\alpha$  – współczynnik zmiany wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien badanej próbki drewna przy zmianie jego wilgotności o 1% ( $\alpha = 0,04$ );

$W$  – wilgotność drewna próbki w chwili badania oznaczona metodą suszarkowo – wagową [%].

## 6. Wyniki i analiza badań

### 6.1. Gęstość drewna

Wyniki badań w postaci wartości liczbowych gęstości wszystkich grup próbek drewna poddano analizie statystycznej.

Przeprowadzono porównanie rozkładów gęstości wszystkich grup drewna z rozkładem normalnym – do tego celu wykorzystano test zgodności chi–kwadrat. Rozkłady gęstości wszystkich grup pomiarowych wykazują zgodność z rozkładem normalnym (tabela 19).

Tabela 19. Wyniki porównania rozkładów gęstości drewna poszczególnych grup z rozkładem normalnym (dla poziomu  $p > 0,05$ )

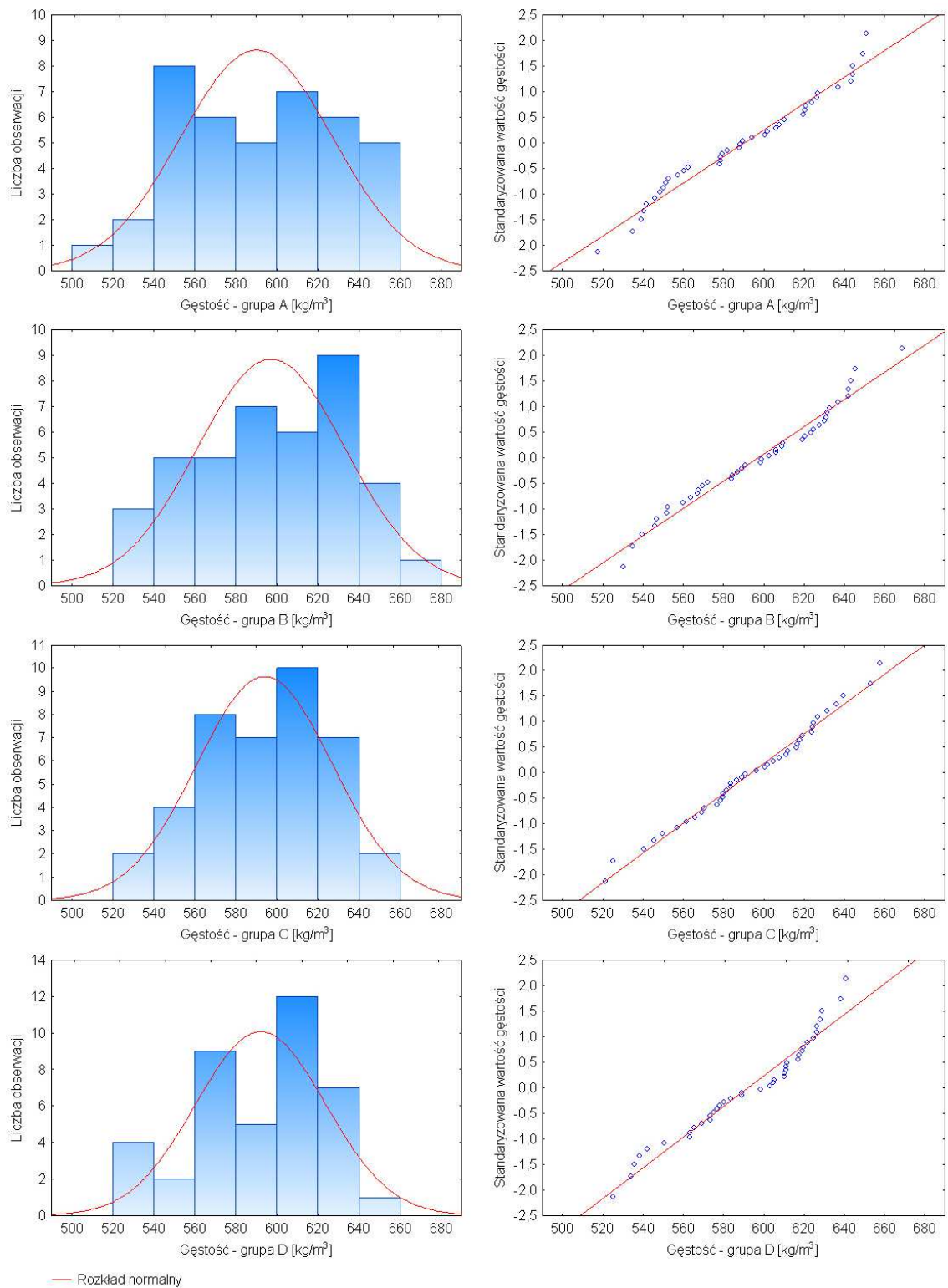
Test Chi – kwadrat	Grupa A	Grupa B	Grupa C	Grupa D
Rozkład normalny	0,095	0,706	0,706	0,358

Rozkład normalny widoczny jest ponadto na histogramach rozkładów gęstości poszczególnych grup drewna, wykazują to również wykresy normalności, które ukazują wysoki stopień podlegania rozkładowi normalnemu we wszystkich przypadkach (rys. 50). Należy jednak zwrócić uwagę na próbki grup B i C, które zarówno w wyniku przeprowadzonego testu chi–kwadrat jak i na wykresach charakteryzują się najwyższą zgodnością z rozkładem normalnym. Próbki te zostały przygotowane zgodnie z normą i charakteryzowały się mniejszymi wymiarami. Umożliwiło to wyselekcjonowanie drewna o regularnej ilości oraz przebiegu przyrostów rocznych, te podstawowe cechy budowy anatomicznej miały zasadniczy wpływ na rozkład gęstości, który był najbardziej zbliżony do rozkładu normalnego.

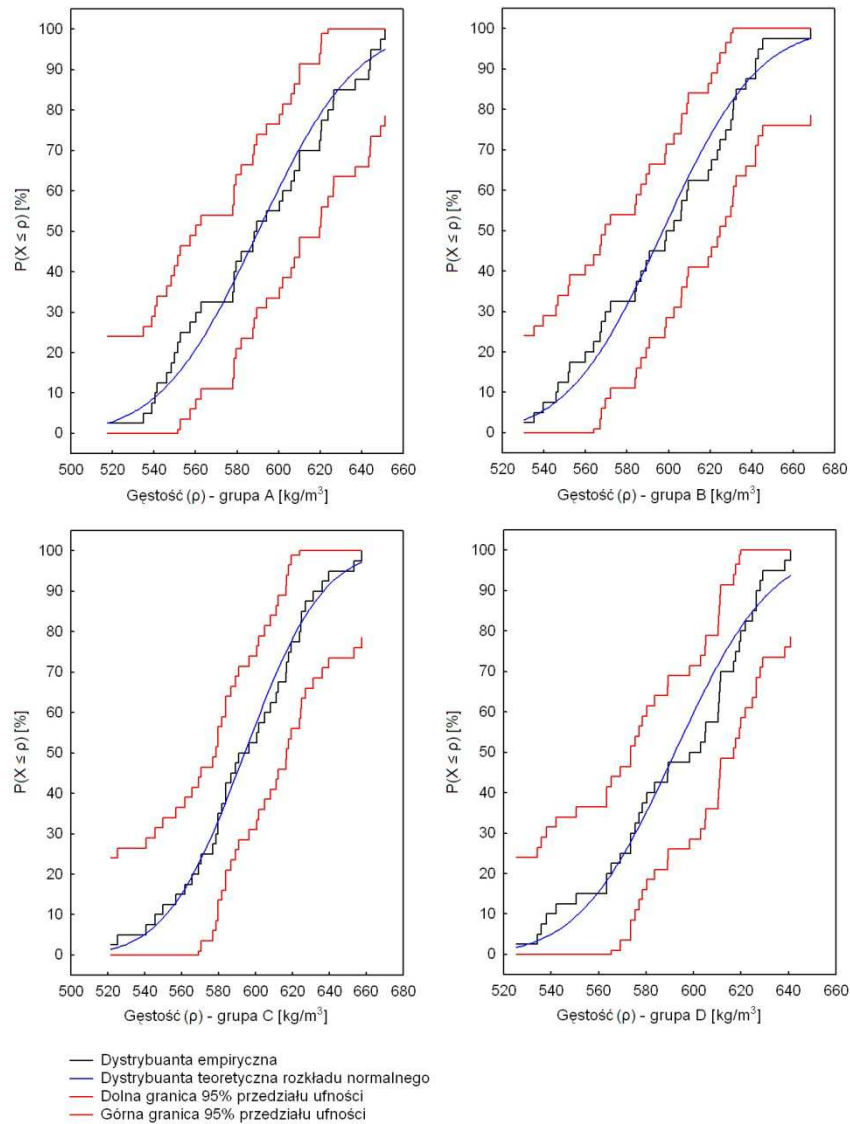
Rozkład normalny badanych grup drewna potwierdziły również wykresy, na których porównano dystrybucję empiryczną poszczególnych rozkładów gęstości z dystrybucją teoretyczną rozkładu normalnego (rys. 51). W tym przypadku również najbardziej uwidoczniło się dopasowanie dystrybucji w przypadku grup próbek normatywnych (mniejszych) B i C.

Warto nadmienić, iż we wszystkich przypadkach, zakresy zmienności gęstości są bardzo zbliżone (rys. 52). Wartości średnie znajdują się w przedziale  $590,1 \text{ kg/m}^3$  (grupa A) –  $597,2 \text{ kg/m}^3$  (grupa B). Większe

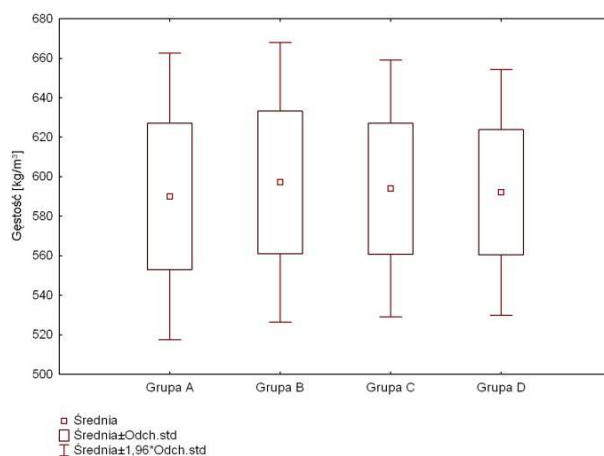
różnice w zakresie zmienności wykazują grupy próbek A i B, natomiast grupy C i D charakteryzują się większą regularnością.



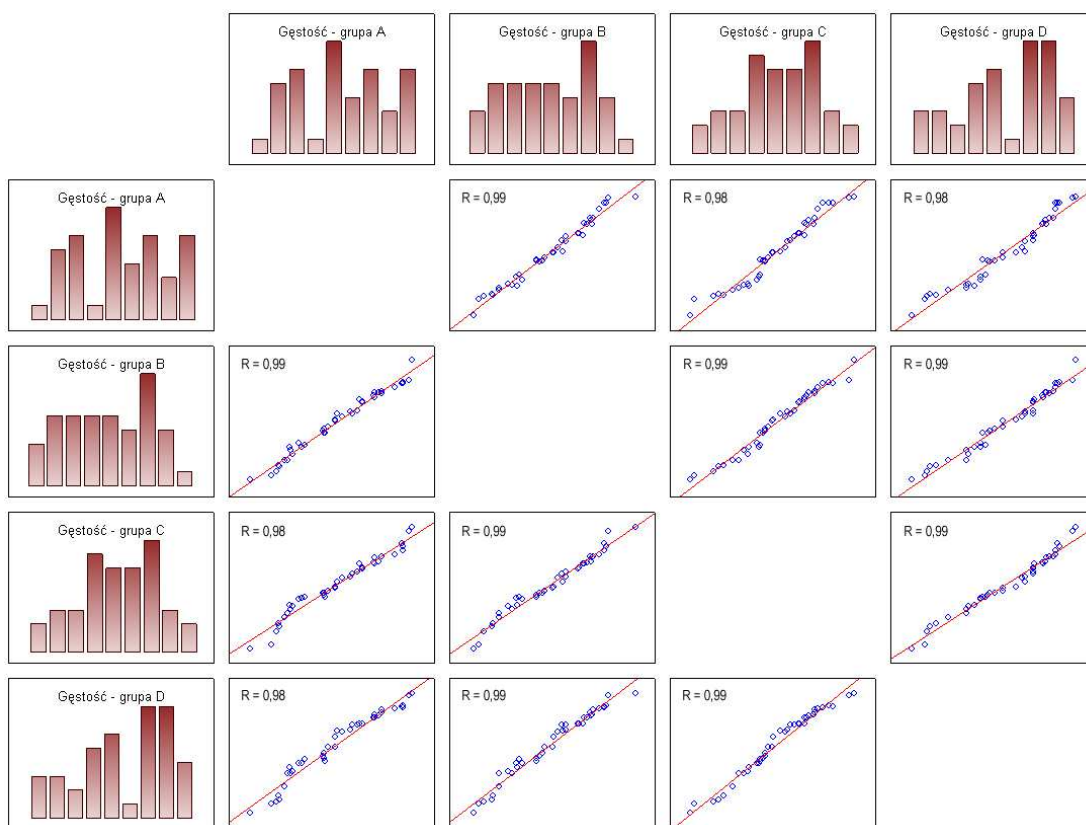
Rys. 50. Histogramy przedstawiające porównanie rozkładów gęstości drewna z rozkładem normalnym oraz wykresy normalności dla poszczególnych grup



Rys. 51. Porównanie dystrybuanty empirycznej rozkładów gęstości drewna badanych grup z dystrybuantą teoretyczną rozkładu normalnego



Rys. 52. Wykres przedstawiający zakresy zmienności gęstości drewna dla wszystkich grup



Rys. 53. Histogramy oraz wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami gęstości drewna poszczególnych grup (oznaczone współczynniki korelacji są istotne dla  $p < 0,05$ )

Dla wszystkich rozkładów gęstości przeprowadzono również analizę korelacji, która została przedstawiona na wykresach rozrzutu (rys. 53). We wszystkich przypadkach otrzymano praktycznie pełną, liniową, dodatnią zależność pomiędzy analizowanymi cechami o czym świadczą wysokie wartości współczynników korelacji.

Wyniki powyższych analiz jednoznacznie potwierdzają jednorodność materiału badawczego w kontekście źródła jego pochodzenia. Gęstość poszczególnych grup próbek drewna wykazuje zbliżone cechy zarówno pod względem wartości liczbowych, rozkładów oraz ich zależności. Powyższe wnioski wskazują na właściwy wybór materiału do badań w wyniku wytrzymałościowego sortowania tarcicy metodą wizualną oraz właściwy dobór wymiarów i wykonanie próbek drewna przeznaczonego do badań z uwzględnieniem ich charakterystycznych cech anatomicznych.

## 6.2. Moduł sprężystości

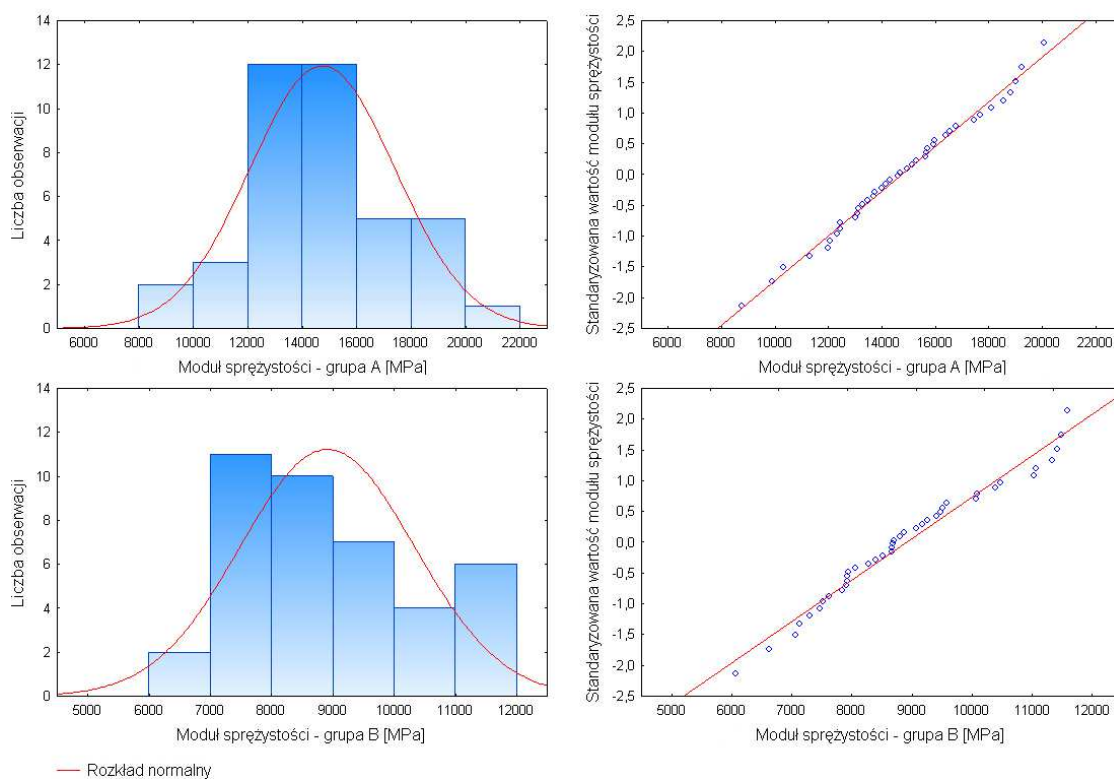
W przypadku badań wytrzymałości mechanicznej na zginanie statyczne próbek drewna grup A i B określono ich moduł sprężystości.

Wyniki analizy rozkładów testem chi–kwadrat dowodzą, iż rozkłady modułów sprężystości tych grup wykazują zgodność z rozkładem normalnym, jednak większą w przypadku próbek grupy A (tabela 20).

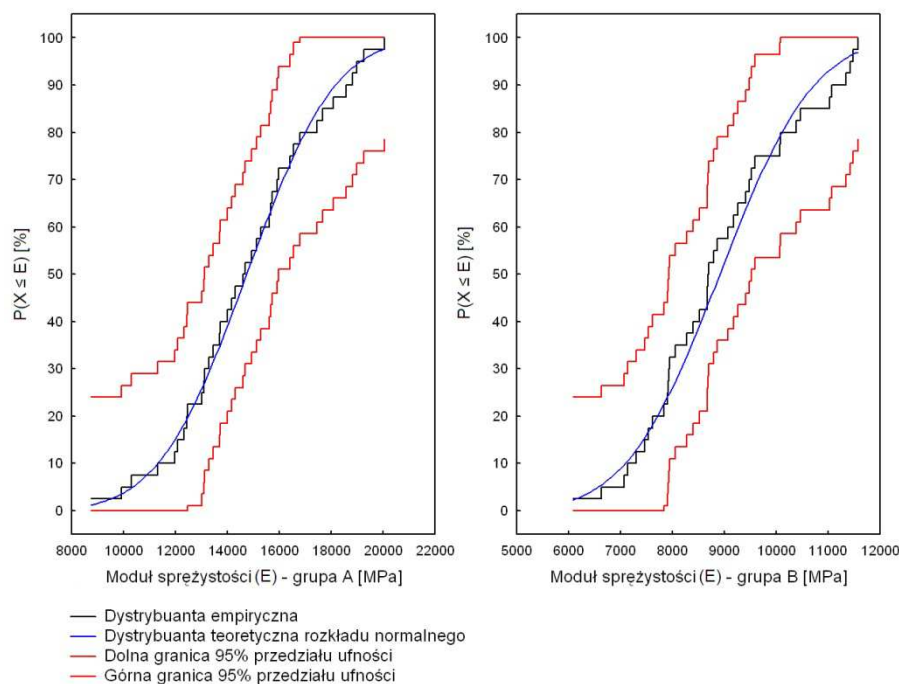
Tabela 20. Zestawienie wyników dopasowania rozkładów modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B z rozkładem normalnym (dla poziomu  $p > 0,05$ )

Test Chi – kwadrat	Grupa A	Grupa B
Rozkład normalny	0,909	0,272

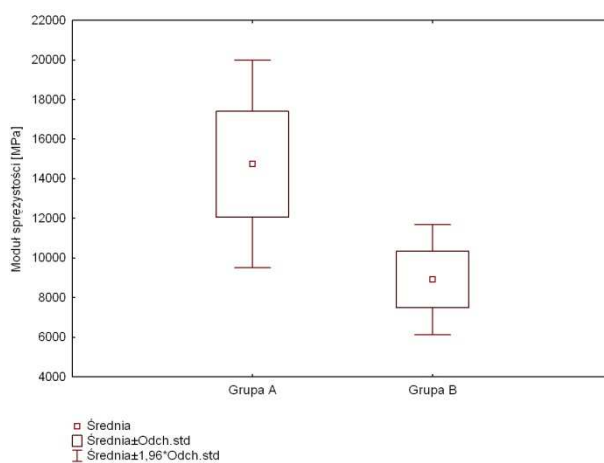
Histogramy oraz wykresy normalności przedstawiające rozkłady modułów sprężystości również ukazują ich zgodność z rozkładem normalnym, jednak wyraźnie mniejszą tendencję wykazuje rozkład próbek grupy B (rys. 54).



Rys. 54. Histogramy przedstawiające porównanie rozkładów modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna z rozkładem normalnym oraz wykresy normalności grup A i B



Rys. 55. Porównanie dystrybuanty empirycznej rozkładów modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B z dystrybuantą teoretyczną rozkładu normalnego



Rys. 56. Wykres przedstawiający zakresy zmienności modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B

Podobną zależność przedstawia porównanie dystrybuanty empirycznej z dystrybuantą teoretyczną rozkładu normalnego (rys. 55).

Próbki grupy B wykazują mniejszy zakres zmienności oraz niższe wartości modułu sprężystości – średnia 8911,4 MPa w stosunku do próbek grupy A – średnia 14742 MPa (rys. 56). Wynika to z bardziej regularnej budowy i wyeliminowaniu niejednorodności w makrostrukturze drewna próbek grupy B. Próbki grupy A zawierały wady w stopniu dopuszczalnym dla klasy wyborowej,



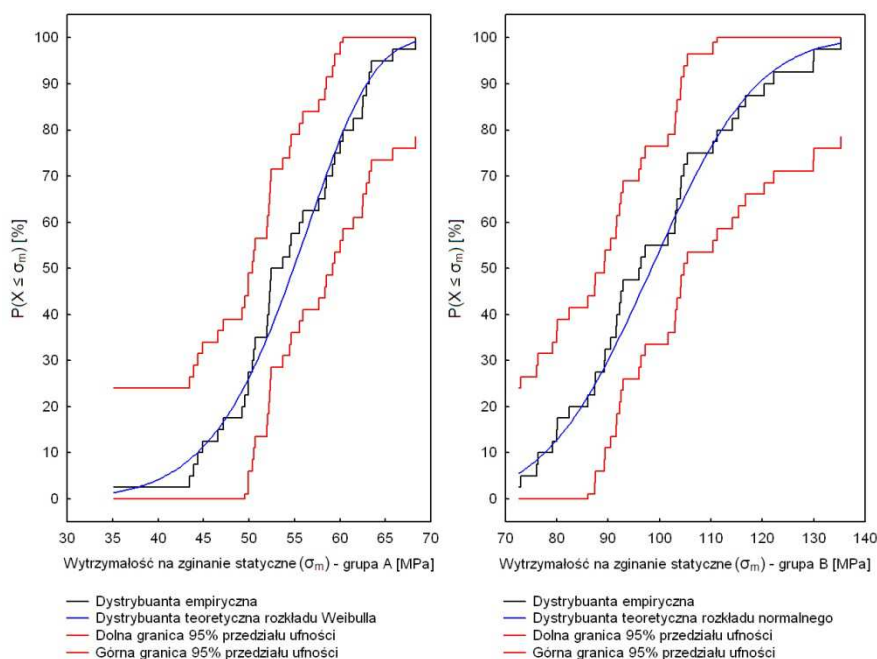
zatem ich obecność w formie np. sęków oraz bardziej niejednorodnej budowy na trzech poziomach struktur drewna, wpłynęła zasadniczo na zwiększenie zakresu zmienności modułu sprężystości.

### 6.3. Wytrzymałość na zginanie statyczne

W wyniku analizy rozkładów próbek drewna, które zostały poddane badaniom wytrzymałości na zginanie statyczne, z zastosowaniem testu chi–kwadrat stwierdzono, iż rozkład próbek grupy A jest wykazuje większą zgodność z rozkładem Weibulla, natomiast rozkład próbek grupy B wykazuje większą zgodność z rozkładem normalnym (tabela 21).

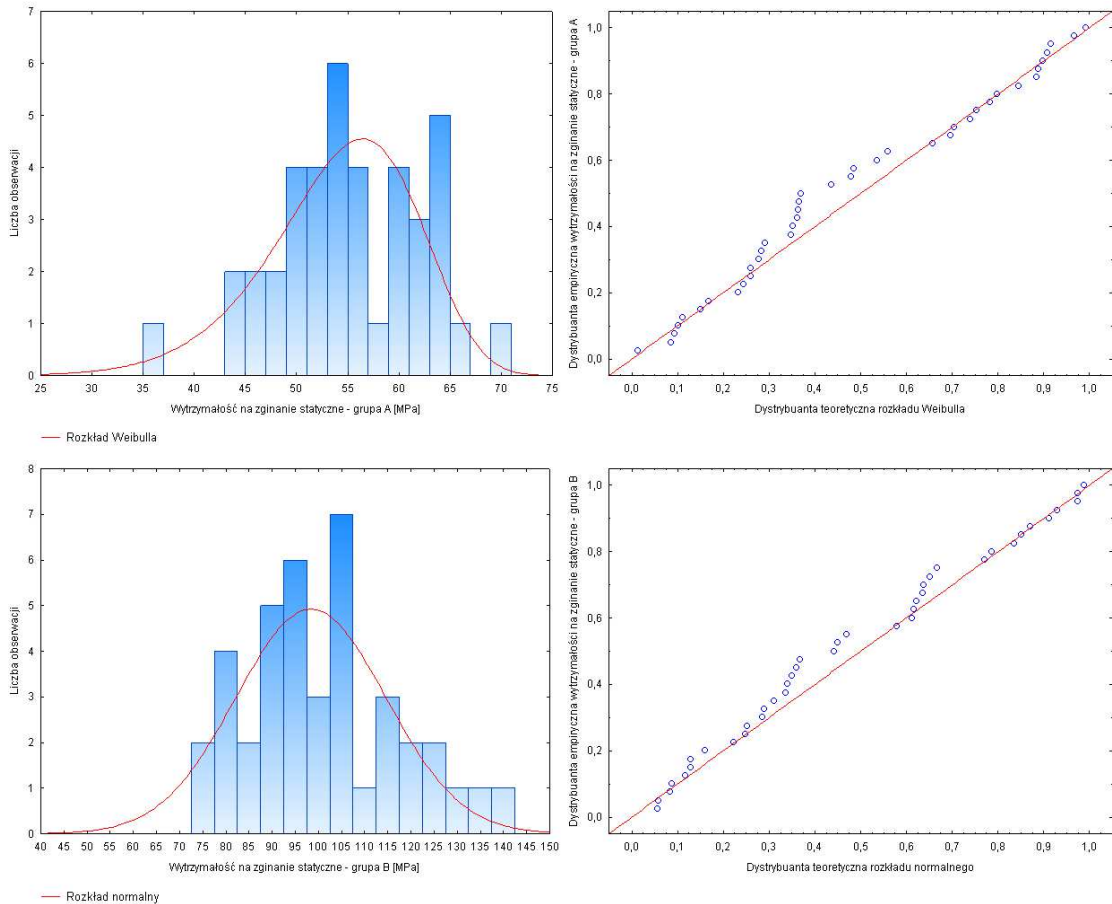
Tabela 21. Zestawienie wyników dopasowania rozkładów wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B z rozkładem normalnym i rozkładem Weibulla (dla poziomu  $p > 0,05$ )

Test Chi – kwadrat	Grupa A	Grupa B
Rozkład normalny	0,272	0,545
Rozkład Weibulla	0,549	0,179



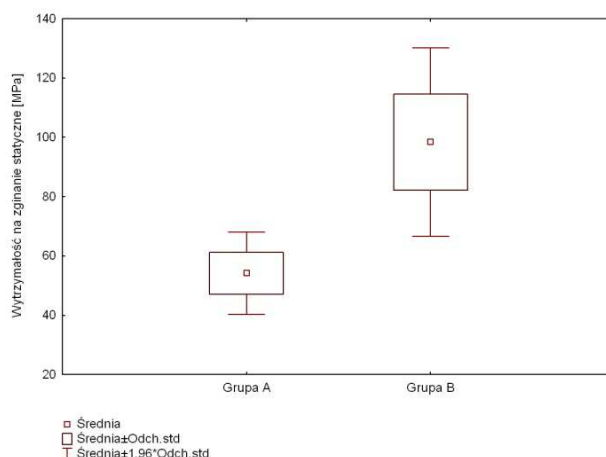
Rys. 57. Porównanie dystrybuanty empirycznej rozkładów wytrzymałości na zginanie statyczne drewna badanych grup z dystrybuantą teoretyczną rozkładu Weibulla (grupa A) i rozkładu normalnego (grupa B)

Wyniki testu potwierdzają również porównania dystrybuanty (rys. 57), histogramy przedstawiające rozkłady grup A i B, a także wykresy prawdopodobieństwa, na których wykreślono dystrybuantę empiryczną w funkcji dystrybuanty teoretycznej (rys. 58).



Rys. 58. Histogramy przedstawiające porównanie rozkładów wytrzymałości na zginanie statyczne drewna z rozkładem Weibulla (grupa A) i rozkładem normalnym (grupa B) oraz wykresy prawdopodobieństwa dla grup A i B

Ponadto podobnie jak w przypadku modułu sprężystości w sposób widoczny zaznaczyły się różnice w zakresie zmienności wartości wytrzymałości na zginanie statyczne grup próbek A i B. W odróżnieniu jednak do analizy poprzedniej wartości mniejszy zakres wartości przyjmuje grupa A – średnia 54,2 MPa, natomiast grupa B – średnia 98,4 MPa (rys. 59). Oznacza to tendencję do większej wytrzymałości na zginanie statyczne próbek drewna o mniejszych wymiarach o bardziej regularnym przebiegu przyrostów rocznych, a co za tym również bardziej uporządkowanej wewnętrznej strukturze drewna pozbawionej wad.



Rys. 59. Wykres przedstawiający zakresy zmienności wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B

#### 6.4. Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien

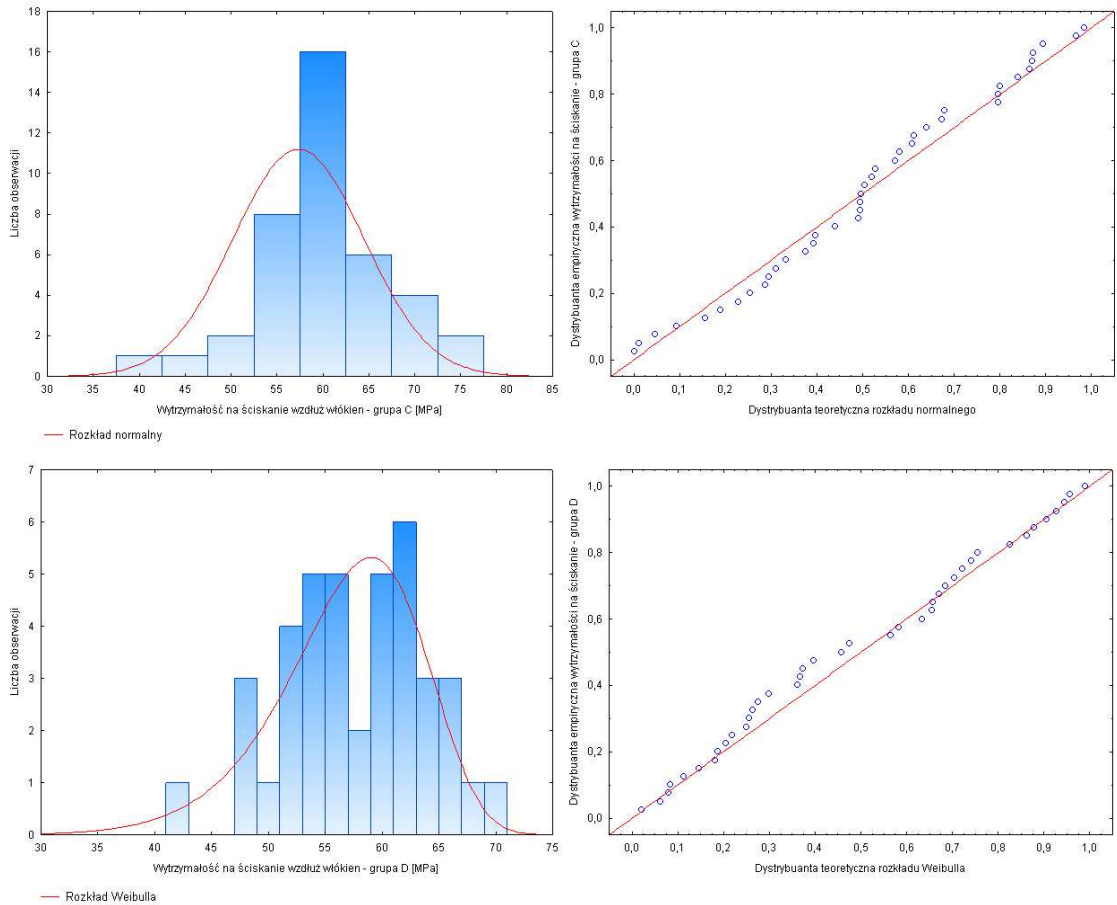
Analiza dopasowania rozkładów wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien z zastosowaniem testu chi–kwadrat w przypadku próbek grupy C wykazała większą zgodność z rozkładem normalnym, natomiast rozkład próbek grupy D wykazał większą zgodność z rozkładem Weibulla (tabela 22).

Tabela 22. Zestawienie wyników dopasowania rozkładów wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna grup C i D z rozkładem normalnym i rozkładem Weibulla (dla poziomu  $p > 0,05$ )

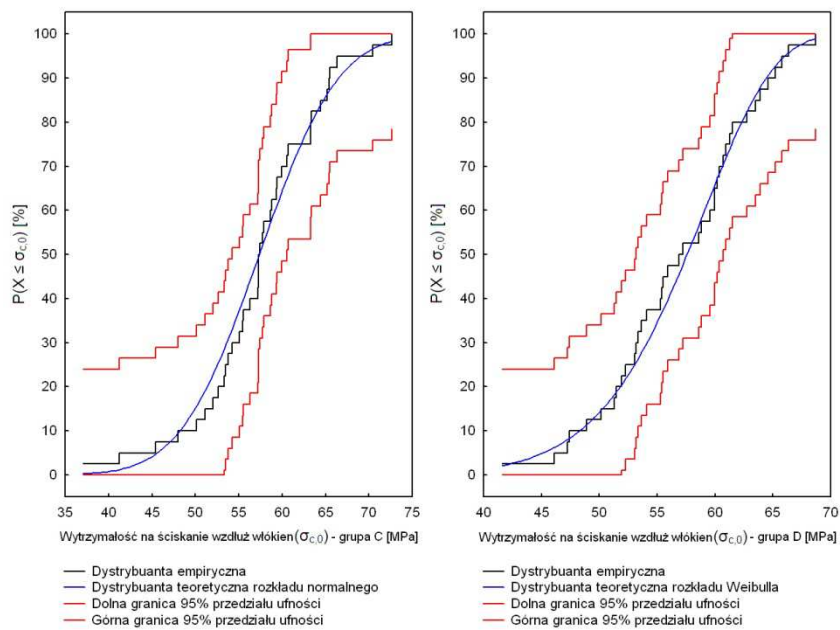
Test Chi – kwadrat	Grupa C	Grupa D
Rozkład normalny	0,535	0,566
Rozkład Weibulla	0,197	0,598

Wyniki powyższej analizy potwierdzają również histogramy oraz wykresy prawdopodobieństwa (rys. 60), a także porównanie dystrybuanty (rys. 61).

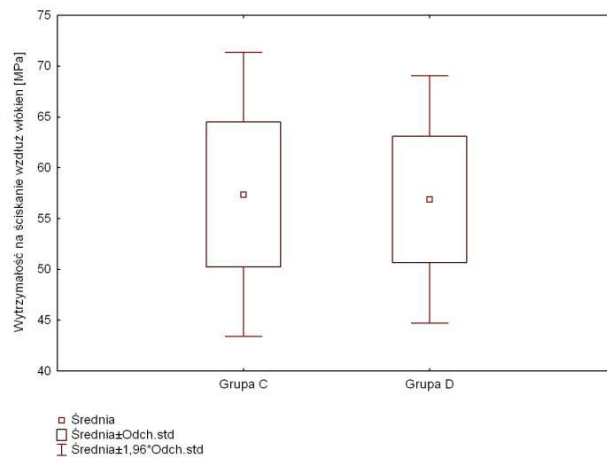
Zakresy zmienności oraz wartości wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien w grupach C (średnia – 57,3 MPa) i D (średnia – 56,9 MPa) są zbliżone (rys. 62). Może to być związane z większą wytrzymałością drewna na działanie siły wzdłuż włókien w założonym zróżnicowaniu wymiarowym próbek grup C i D.



Rys. 60. Histogramy przedstawiające porównanie rozkładów wytrzymałości na zginanie statyczne drewna z rozkładem normalnym (grupa C) i rozkładem Weibulla (grupa D) oraz wykresy prawdopodobieństwa dla grup C i D



Rys. 61. Porównanie dystrybuanty empirycznej rozkładów wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna z dystrybuantą teoretyczną rozkładu normalnego (grupa C) i rozkładu Weibulla (grupa D)



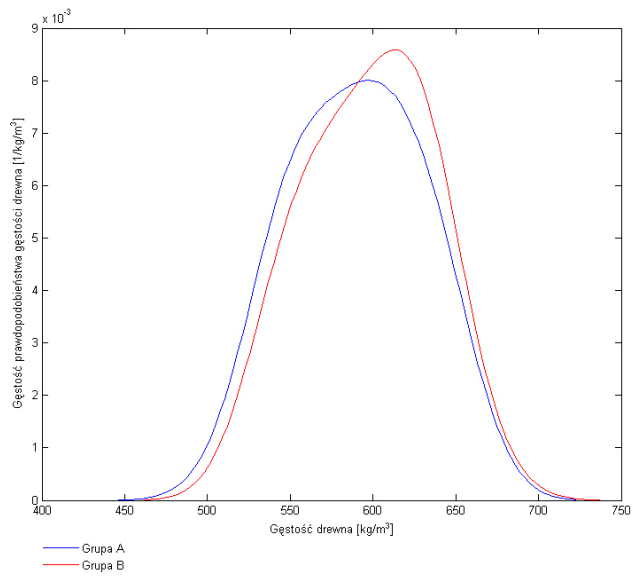
Rys. 62. Wykres przedstawiający zakresy zmienności wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna grup C i D

### 6.5. Efekt skali

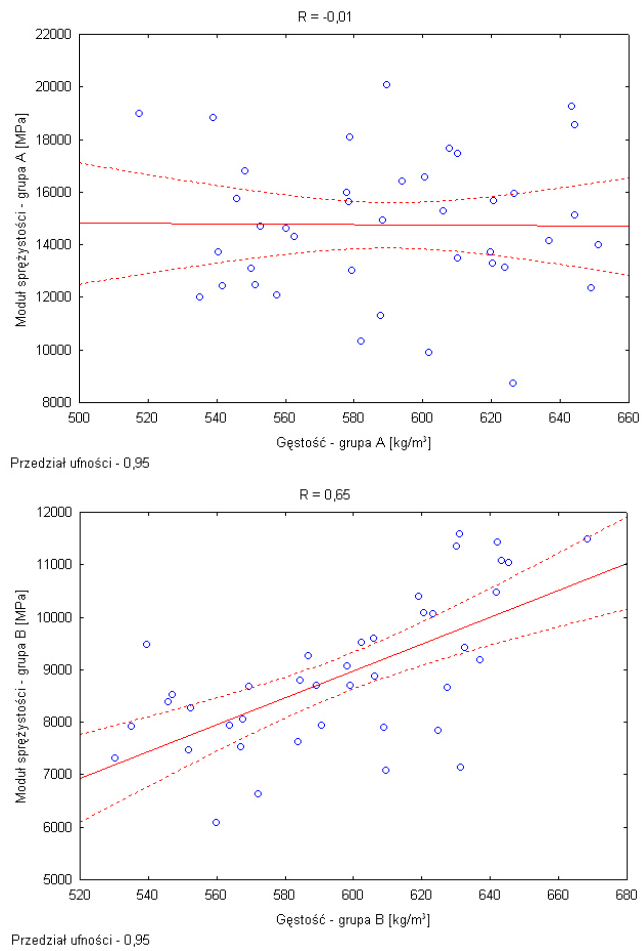
Wcześniejsza analiza statystyczna wykazała charakterystyki rozkładów poszczególnych cech wytrzymałościowych badanych próbek drewna w poszczególnych grupach. Na podstawie zobrazowanych wyników badań można dostrzec tendencję do zgodności rozkładów tych cech z rozkładem normalnym w przypadku małych próbek drewna grup B i C oraz z rozkładem Weibulla w przypadku większych próbek drewna grupy A i D. Znamienne jest występowanie zmian zarówno w przypadku badania wytrzymałości na zginanie statyczne jak również wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.

W celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy wyników badań porównano ze sobą zależności pomiędzy grupami próbek A i B poddawanych wytrzymałości na zginanie statyczne oraz grupami próbek C i D poddawanych wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien. W każdym z przypadków analizy oparto na wykresach rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” poszczególnych cech.

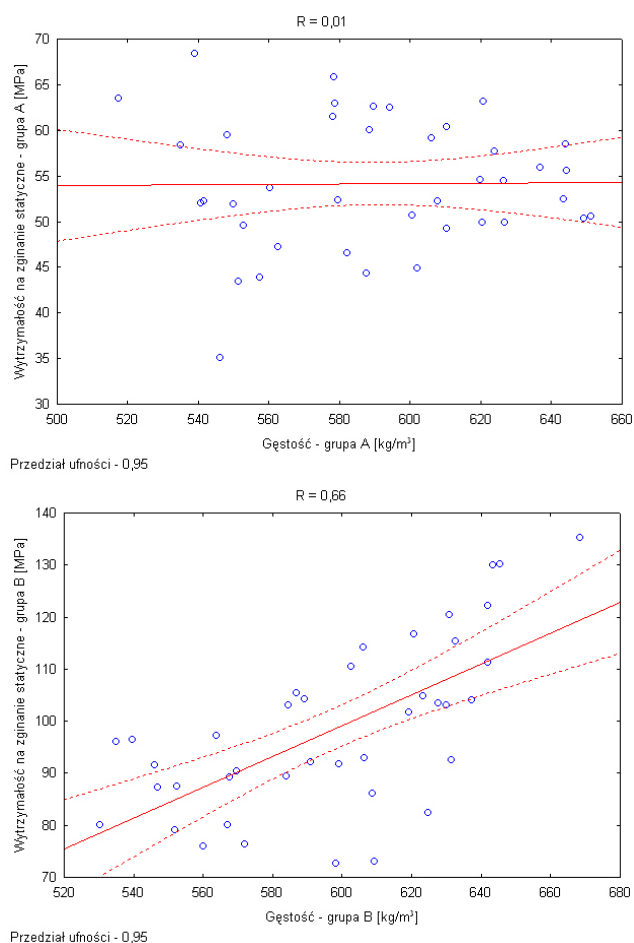
W pierwszym przypadku porównano rzeczywiste rozkłady gęstości (rys. 63), które jak wykazały wcześniejsze analizy ściśle ze sobą korelowały pomimo wystąpienia prawostronnej asymetrii w rozkładzie grupy B. Następnie przeprowadzono analizę zależności między rozkładami gęstości i modułu sprężystości (rys. 64) oraz rozkładu gęstości i wytrzymałości na zginanie statyczne (rys. 65).



Rys. 63. Porównanie rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” gęstości drewna grup A i B



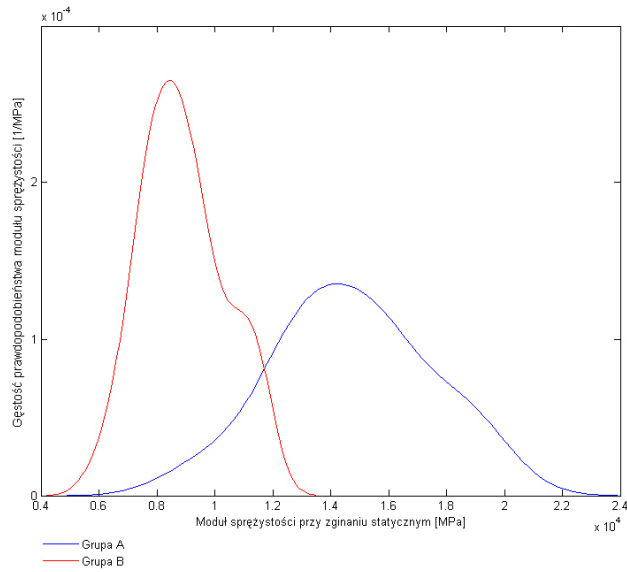
Rys. 64. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami gęstości drewna i rozkładami modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B



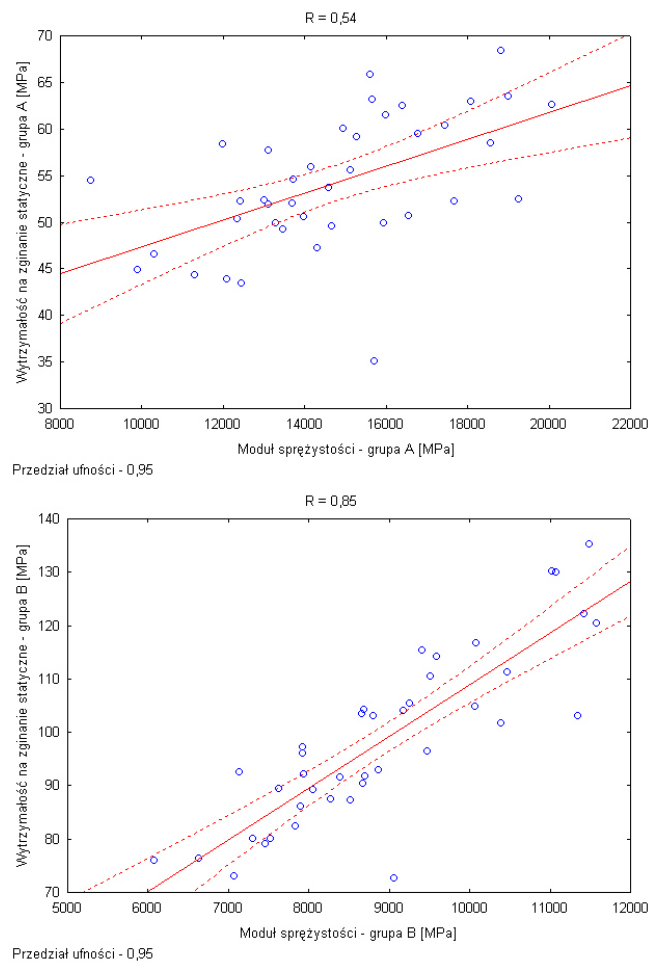
Rys. 65. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami gęstości drewna i rozkładami wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B

Wyniki przedstawione w postaci wykresów rozrzutu wykazały brak korelacji między tymi cechami w grupie A, natomiast w grupie B otrzymano liniową, dodatnią zależność pomiędzy analizowanymi cechami o czym świadczą wartości współczynników korelacji ( $R = 0,65$  i  $R = 0,66$ ).

W przypadku rzeczywistych rozkładów modułu sprężystości można zauważyć lewostronną asymetrię w rozkładach grup oraz większą kurtozę występującą w rozkładzie grupy A (rys. 66). Między rozkładami miejscowego modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie statyczne otrzymano liniowe, dodatnie zależności, które w przypadku grupy A wykazują korelację umiarkowaną natomiast w przypadku grupy B korelację wysoką (rys. 67).



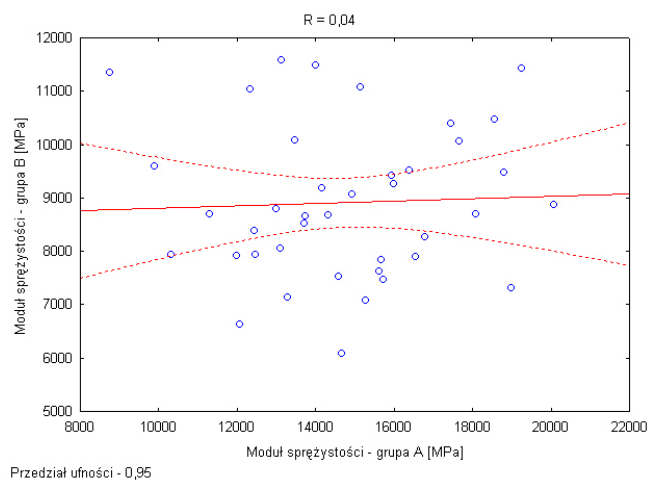
Rys. 66. Porównanie rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B



Rys. 67. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna i rozkładami wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B



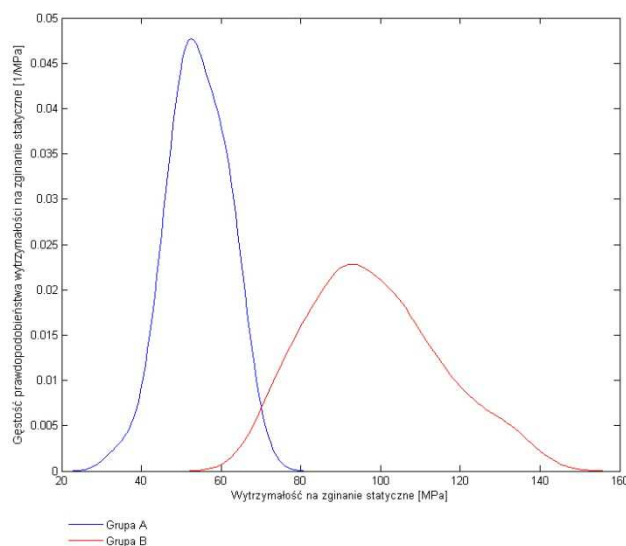
Nie stwierdzono zależności między rozkładami modułu sprężystości grup A i B (rys. 68).



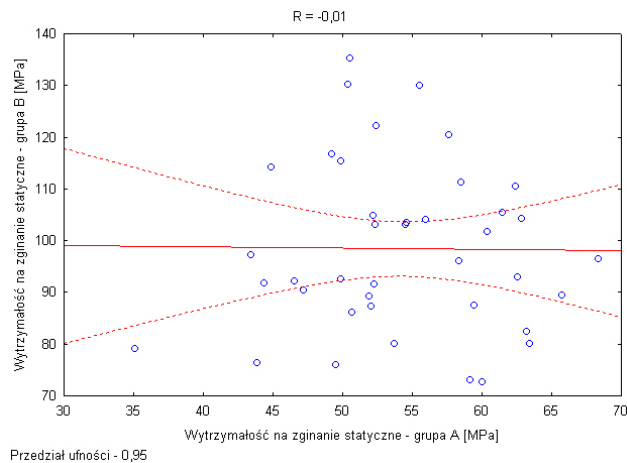
Rys. 68. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami modułu sprężystości przy zginaniu statycznym drewna grup A i B

Wygładzone rozkłady rzeczywiste wytrzymałości na zginanie statyczne grup A i B wykazują odmienną tendencję w stosunku do poprzedniej cechy (rys. 69). W tym przypadku również wykazano asymetrię lewostronną w rozkładach grup, ale większa kurtoza pojawiła się w przypadku grupy B.

Nie stwierdzono zależności między rozkładami wytrzymałości na zginanie statyczne grup A i B (rys. 70).



Rys. 69. Porównanie rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B



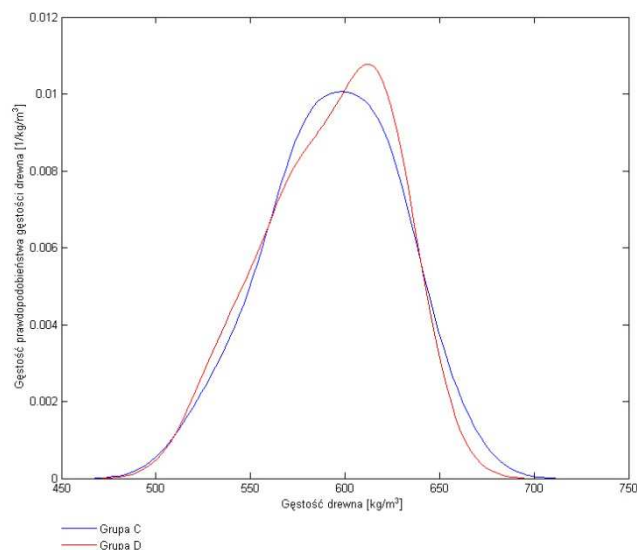
Rys. 70. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami wytrzymałości na zginanie statyczne drewna grup A i B

W wyniku analizy wyników badań wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien porównano rzeczywiste wygładzone rozkłady gęstości i podobnie jak w przypadku zginania rozkłady były zbliżone natomiast rozkład próbek większych (grupa D) wykazywał asymetrię lewostronną (rys. 71).

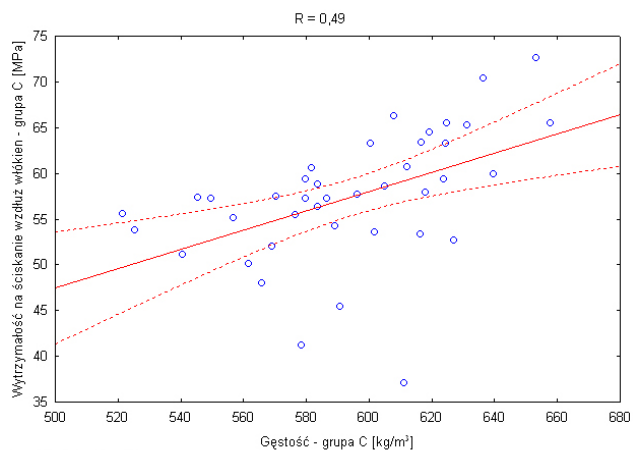
W przypadku zależności między rozkładami gęstości i wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, analiza wykazała dodatnie, liniowe, korelacje umiarkowane (rys. 72).

Porównanie rozkładów rzeczywistych wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien wykazało podobieństwo wobec siebie oraz analogicznie jak w przypadku rozkładów gęstości asymetrię lewostronną rozkładu grupy D (rys. 73).

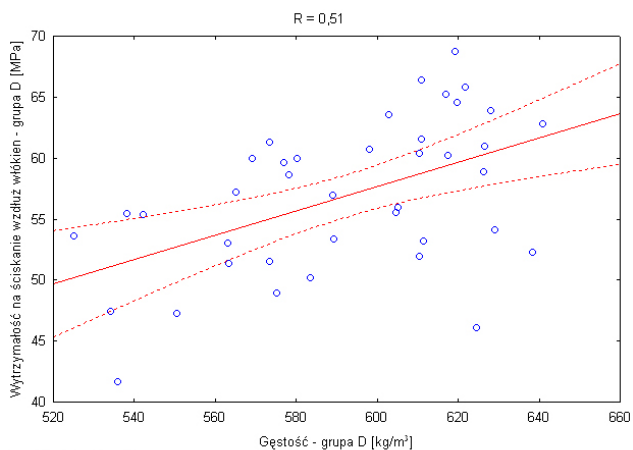
Między rozkładami wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien grup C i D nie wykazano zależności (rys. 74).



Rys. 71. Porównanie rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” gęstości drewna grup C i D

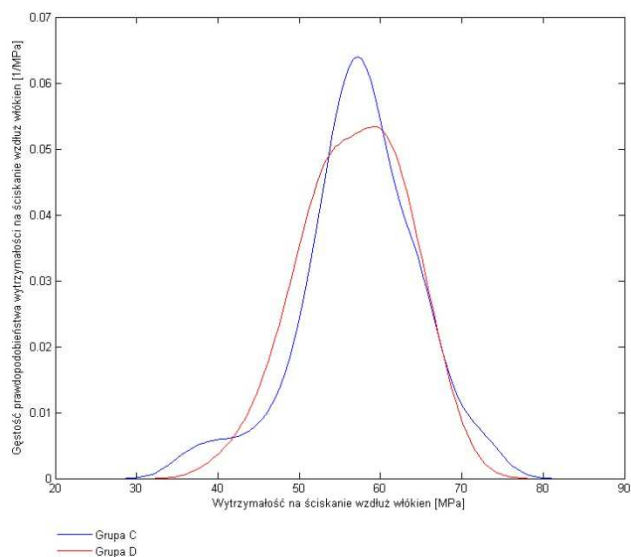


Przedział ufności - 0,95

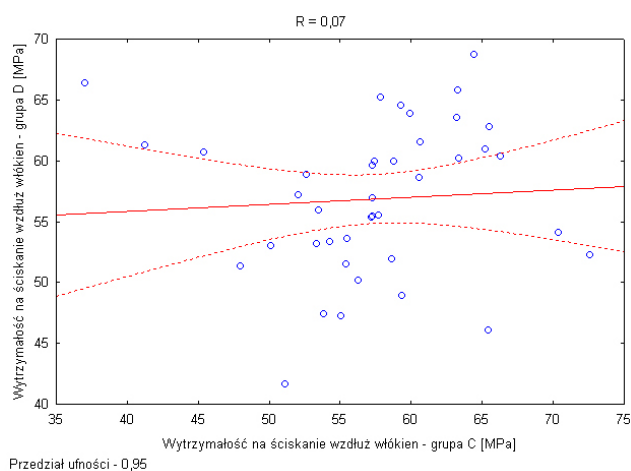


Przedział ufności - 0,95

Rys. 72. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami gęstości drewna i rozkładami wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna grup C i D



Rys. 73. Porównanie rozkładów rzeczywistych „wygładzonych” wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna grup C i D



Rys. 74. Wykresy rozrzutu przedstawiające zależności między rozkładami wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien drewna grup C i D

W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej rozkładów badanych właściwości wszystkich grup drewna można stwierdzić obecność zależności między tymi rozkładami. Cechą grupującą wszystkie próbki drewna była jego gęstość, której rozkłady były zgodne z rozkładem normalnym i wykazywały względem siebie pełną zależność. Oznaczało to właściwy dobór materiału porównawczego do badań.

W badaniach mechanicznych właściwości drewna zaznacza się wpływ anizotropii drewna, który wynika ze zmienności orientacji elementu drewna i kierunku obciążenia względem głównych kierunków anizotropii. Próbki drewna grupy A i B poddano badaniu wytrzymałości na zginanie statyczne i dla każdej próbki określono moduł sprężystości, kierunek obciążenia skierowany był prostopadle do przebiegu włókien, natomiast na próbkach drewna grup C i D określano wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien. Analiza wyników badań potwierdza wpływ powyższych założeń.

W przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych przy porównaniu właściwości poszczególnych grup próbek w powiązaniu z ich wymiarami i strukturą można zauważyć wystąpienie efektu skali.

Małe próbki drewna grup B i C, zostały przygotowane zgodnie z normą, a więc zachowano regularność budowy na poziomie makrostruktury i mikrostruktury oraz nie wykazywały one niejednorodności na poziomie makroskopowym i mikroskopowym. Znalazło to odzwierciedlenie w analizie rozkładów oraz w istotności korelacji między poszczególnymi właściwościami występującymi w tych grupach próbek.

Większe próbki drewna grup A i D ze względu na wymiary były zbliżone do elementów rzeczywistych, zatem nie można było wykluczyć wystąpienia w nich niejednorodności oraz trudniej było zachować regularność budowy na każdym z poziomów struktury. Charakterystyczna była zgodność rozkładów wytrzymałości na zginanie statyczne i ściskanie wzdłuż włókien z rozkładem Weibulla dla tych grup próbek. Prawostronna asymetria rozkładów mogła być wynikiem wpływu powyższych cech drewna na jego właściwości.

W powyższych analizach zjawisko efektu skali zobrazowano przy porównaniu rozkładów rzeczywistych wygładzonych poszczególnych grup próbek drewna. Najbardziej spektakularne odzwierciedlenie tego zjawiska można zauważyć przy porównaniu wyników wytrzymałości na zginanie statyczne oraz ściskanie wzdłuż włókien. W przypadku zginania – rozkład próbek grupy A (próbki niejednorodne) przejawia węższy i niższy zakres wartości w stosunku do rozkładu próbek grupy B. Warto nadmienić, iż w tym przypadku występuje znaczna różnica w wymiarach próbek, a powierzchnia przekroju próbek A ( $5320 \text{ mm}^2$ ) jest o ponad trzynaście raz większa niż powierzchnia przekroju próbki B ( $400 \text{ mm}^2$ ). Zatem uwidacznia się w tym przypadku zależność wytrzymałości badanego elementu od niejednorodności, która może być obecna na każdym poziomie jego struktury, mającej decydujący wpływ na wartość siły niszczącej ten element.

Przy ścisaniu wzdłuż włókien, próbki nie wykazują znacznego zróżnicowania w zakresie i wartościach zmienności tej cechy, pomimo tego iż różnica między powierzchnią przekroju poprzecznego próbek grupy D ( $1225 \text{ mm}^2$ ) była ponad trzykrotnie większa w stosunku do powierzchni przekroju próbek C ( $400 \text{ mm}^2$ ), a ich objętość była ponad dwudziestopięciokrotnie większa. Podobne wartości wytrzymałości zróżnicowanych wymiarowo próbek mogą świadczyć o znacznym wpływie anizotropii cylindrycznej drewna przy oddziaływaniu sił w kierunku wzdłuż włókien, drewno przy takim oddziaływaniu jest stabilniejsze wymiarowo. Ponadto wynikiem wpływu efektu skali w tym przypadku jest również widoczna tendencja do występowania większej liczby próbek w wyższym zakresie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien w grupie D. Rozkład próbek tej grupy jest zgodny z rozkładem Weibulla.

## 7. Wnioski

1. W odróżnieniu od ciał izotropowych i bardziej jednorodnych niż drewno, u których efekt skali wynika głównie z mikroniejednorodności, efekt skali u drewna wynika z jego anizotropii, wad drewna i niejednorodności na poziomie makroskopowym.
2. Wpływ anizotropii drewna na sprężyste i wytrzymałościowe właściwości drewna wynika ze zmienności orientacji elementu drewna i kierunku obciążenia względem głównych kierunków anizotropii; w porównaniu z orientacją małych znormalizowanych próbek.
3. Wpływ niejednorodności drewna na poziomie makroskopowym wynika z lokalizacji zmiennych co do budowy i właściwości mechanicznych tkanek i większych elementów struktury drewna wzdłuż i w poprzek pnia, szerokości słoju rocznych, udziału przyrostów rocznych, udziału twardzieli itp. Stochastycznie rzecz ujmując, im większa jest miąższość elementu drewna tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia zmian w naturalnej budowie elementów struktury drewna.
4. Wpływ naturalnych wad drewna, a zwłaszcza sękatości jest szczególnie istotny w drewnie gatunków, u których ugałężenie powstaje corocznie w postaci okółków (tak jak u sosny będącej obiektem badań). Im większa jest więc długość elementów drewnianych (w kierunku wzdłuż osi pnia i włókien drzewnych), tym większy jest wpływ wad drewna na właściwości drewna, a wyniku tego większy jest efekt skali.
5. Efekt skali jest różny w zależności od metod określania wytrzymałości mechanicznej drewna w aspekcie badań i różnych kierunkach obciążenia drewna w aspekcie zastosowań konstrukcyjnych, co wynika z różnych mechanizmów zniszczenia drewna, możliwych do wytłumaczenia w oparciu o techniczną budowę drewna.

## Literatura

Aicher S., Gustafsson P. J., Haller P., 2002: *Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or a notch*. Report 7134. Lund University, Sweden.

Aicher S., Radovic B., 1999: *Investigations on the influence of finger – joint geometry on tension strength of finger – jointed glulam lamellas*. Holz Roh Werkst., 57 (1).

Aicher S., Reinhard H. W., 1993: *Einfluss der Bauteilgrösse in der linearen und nichtlinearen Holz Bruchmechanik*. Holz Roh Werkstoff, 51.

Aleksandrov A. P., Žurkov S. N., 1933: *Javlenie chrupkogo razryva*. Moskva.

Aliabadi M. H., Rooke D. P., 1993: *Advances in boundary element methods for fracture mechanics*. Computational mechanics. Wessex Institute of Technology, Southampton U. K.

Arnold M., Steiger R., 2006: *The influence of wind – induced compression failures on the mechanical properties of spruce structural timber*. Material and Structures, 40.

Artemov P. Ja., 1956: *Nekotorye voprosy skalyvanija drevesiny*. Sbornik naučnych trudov BLTI, vyp. 8.

Bach L., Pentoney R. E., 1968: *Nonlinear mechanical behavior of wood*. Forest Production Journal, Nr 18 (3).

Balsamo A., Cerone M., Viskovic A.: *New Wooden Structures with Composite Material Reinforcements for Historical Buildings. The Case of the Arena Flooring in the Colosseum*. Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahti, Finland, August 29 – 31, 2001.

Barrett J. D., 1974: *Effect of size on tension perpendicular to grain strength of Douglas fir*. Wood Fiber, Nr 6 (2).

Barten'ev G. M., 1960: *Ob anizotropii i prirode masštabnogo faktora u stekla*. Zavodskaja laboratorija, Nr 9.

Barten'ev G. M., 1964: *Pročnosť i razrušenie vysokoelastičnych materialov*. Moskva – Leningrad.

Bazant Z. P., Pfeiffer P. A., 1987: *Determination of fracture energy from size effect and brittleness number*. ACI Mat. Journal, 84.

Beljankin F. P., Jacenko W. F., 1957: *Deformativnosť i soprotivljaemost' drevesiny kak uprugogo – vjazko – plastičeskogo tela*. Izd. Akademii Nauk USSR, Kiev.

- Bodig J., Goodman J. R., 1973: *Prediction of elastic parameters for wood*. Wood science, Nr 5.
- Bodig J., Jayne B., 1982: *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Company, New York Cincinnati Toronto London Melbourne.
- Bohannon B., 1966: *Effect of Size on Bending Strength of Wood Members*. U. S. Forest Service Research Paper FPL 56.
- Bolotin V. V., 1965: *Statističeskie metody v stroitel'noj mehanike*. Moskva.
- Boone T. J., Wawrzynek P. A., Ingraffea A. R., 1987: *Finite element modeling of fracture propagation in orthotropic materials*. Engineering Fracture Mechanics, 26 (2).
- Borchardt J. K.: *Reinforced plastics help preserve historic buildings*. Reinforced Plastics Volume: 47, December 2003, s. 30 – 32.
- Borovikov A. M., 1970: *Uprugst', vjazkost' i plastičnost' drevesiny*. Derevoobrabatyvajuščaja promyšlennost', Nr 9.
- Bostrom L., 1992: *Method for determination of the softening behavior of wood and applicability of a nonlinear fracture mechanics model*. Report TVBM – 1012, Lund University, Sweden.
- Bryan E. L., Schniewind A. P., 1965: *Strength and rheological properties of particleboard*. Forest Production Journal, Nr 15 (4).
- BS 4978:1996: *Specification for visual strength grading of softwood*. British Standard.
- Buchanan A. H., 1984: *Strength Model and Design Method for Bending and Axial Load Interaction in Timber Members*. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Bucur V., 2003: *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer Verlag.
- Burger N., Glos P., 1995: *Relationship of moduli of elasticity in tension and in bending of solid timber*. Paper 28, Copenhagen, Denmark.
- Burger N., Glos P., 1997: *Strength relationships in structural timber subjected to bending and tension*. Paper 30, Vancouver, Canada.
- Bykovskij V. N., 1950: *Osnovy praktičeskogo sposoba podbora stroitel'noj drevesiny v elementach konstrukciji*. Sbornik trudov NII, vyp. 3.
- Bykovskij V. N., 1958: *Soprotivlenie materialov vo vremeni s yčotom statističeskich faktorov*. Moskva.



- Choi Y. H. i inni, 1998: *Finite element model for nailed joints under reversed cyclic load*. Journal Struct. Engineering, ASCE 124 (1).
- Clouser W. S., 1959: *Creep of small wood beams under constant bending load*. U. S. Forest Products Lab., Report 2150.
- Conners T. E., Medvecz P. J., 1992: *Wood as a bimodular material*. Wood Fiber Sci., 24 (4).
- Core H. A., Cote' W. A., Day A. C., 1979: *Wood structure and identification*. University Press Syracuse N. Y.
- Coureau J – L., Gustafsson P. J., Persson K., 2006: *Elastic layer model for application to crack propagation problems I timber engineering*. Wood Sci. Technol., 40.
- Cowin S. C., 1979: *On the strength anisotropy of bone and wood*. Trans ASME, Nr 46 (6).
- Čečulin B.B., 1954: *K statističeskoj teoriji chrupkoj pročnosti*. Žurnal tehničeskoj fiziki, t. 24, wyp. 2.
- Čečulin B.B., 1960: *K voprosu o masštabnom faktore*. Zavodskaja laboratoria. Nr 9.
- Čečulin B.B., 1963: *Masštabnyj faktor i statističeskaja priroda pročnosti metallov*. Moskva.
- Davidenkov N.N., 1960: *O vlijanii razmerov obrazcov na ich mehaničeskie svojstva*. Zavodskaja laboratorija, Nr 3.
- Davids W. G., Landis E. N., Vasic S., 2003: *Lattice models for the prediction of load – induced failure and damage in wood*. Wood Fiber Sci., 35 (10).
- Daudeville L. i inni, 1999: *Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints*. Wood Sci. Technol., 33 (1).
- DIN 4074; 1989: *Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit*. Nadelschnittholz.
- Dinwoodie J., 1975: *Timber – a review of the structure – mechanical property relationship*. Journal of microscopy, vol. 104, nr 1.
- Dornyak O. R., 2005: *Mathematical modeling of the process of compaction of wood*. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, vol. 78, 5.
- Dubois F., Randriambololona H., Petit C., 2005: *Creep in Wood Under Variable Climate Conditions: Numerical Modeling and Experimental Validation*. Mechanics of Time – Dependent Materials, 9.

- Dzbeński W., 1973: *Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy sosnowej na zasadzie ugięć pod obciążeniami statycznymi*. Przemysł drzewny, Nr 9.
- Dzbeński W., 1983: *Charakterystyka techniczna i warunki stosowania tarcicy sortowanej metodami wytrzymałościowymi*. Prace Nauk. Politechniki Szczecińskiej 234.
- Dzbeński W., 1984: *Nieniszczące badania mechanicznych właściwości iglastej tarcicy konstrukcyjnej wybranymi metodami statycznymi i dynamicznymi*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Dzbeński W., Kozakiewicz P., Krzosek S., 2005: *Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy budowlano – konstrukcyjnej*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Dzbeński W., Sosnowski A., 1995: *Wytrzymałość na ścinanie elementów konstrukcyjnych z dopuszczalnymi sękami*. Mat. konf. „Badania dla meblarstwa”. Warszawa.
- Dziewanowski R., 1967: *Zarys rejonizacji jakościowej sosnowego drewna tartaczego w Polsce*. Prace Instytutu Technologii Drewna, rok XIV, zeszyt 4 (44), s. 5 – 24, Poznań.
- EN 338 (2003): *Structural timber – strength classes*. Comite' Europe'en de Normalisation CEN.
- EN 408 (2003): *Timber structures – structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties*. CEN.
- EN 384 (2004): *Structural timber: determination of characteristic values of mechanical properties and density*. CEN.
- Farruggia F., Perre' P., 2000: *Microscopic tensile test in the transverse plane of earlywood and latewood parts of spruce*. Wood Sci. Technol., 34.
- Foschi R. O., Barrett I. D., 1976: *Longitudinal Shear Strength of Douglas Fir*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 3, Nr 2.
- Garcia R., Triboulot M. C., Merlin A., Deglise X., 2000: *Variation of the viscoelastic properties of wood as a surface finishes substrate*. Wood Sci. Technol., 34.
- Gehri E., 1997: *Timber as a natural composite: Explanation of some peculiarities in the mechanical behavior*. Paper 30, Vancouver, Canada.
- Gindl W., Teischinger A., 2002: *Axial compression strength of Norway spruce related to structural variability and lignin content*. Appl. Sci. Manufact., 33.
- Glos P., 1982: *Die maschinelle Sortierung von Schnittholz Stand der Technik – Vergleich der Verfahren*. Holz – Zentralblatt 13.

- Glos P., Denzler I. K., 2004: *Einfluss von Faserstauchungen auf die Festigkeit von Fichtenbauholz*. *Schweiz Zeit. Forstwes.*, 155 (12).
- Gubenko A. B., 1957: *Kleenye derevjannye konstrukciji*. Moskva.
- Goodman J. R., Bodig J., 1970: *Orthotropic elastic properties of wood*. *Journal Struct. Div. ASCE*, Nr 96.
- Gustafsson P. J., 2003: *Crack propagation in wood and wood products*. *Second Inter. Conf. of the ESWM*, Stockholm.
- Gutkowski R. M. i inni, 1996: *Formulation of a bondline element for modeling glued joints in wood*. *Journal Teor. Appl. Mech.*, 34(1).
- Hanhijarvi A., Hunt D., 1998: *The viscoelasticity of wood at varying moisture content*. *Wood Sci. Technol.*, 32.
- Hoffmeyer P., 1990: *Failure of wood as influenced by moisture and duration of load*. Dept. Environmental Science and Forestry. State Univ. of New York, Syracuse N. Y.
- Hoffmeyer P., Davidson P., 1989: *Mechano – sorptive creep mechanism of wood in compression and bending*. *Wood Sci. Technol.* 23.
- Holmberg S., 1999: *Nonlinear mechanical behavior and analysis of wood and fibre materials*. *Comput. Struct.*, 72.
- Houška A., Koc P., 2000: *Sorptive Stress Estimation: An Important Key to the Mechano – Sorptive Effect in Wood*. *Mechanics of Time – Dependent Materials*, 4, Netherlands.
- Iwanov A. J., 1968: *Rukovodstvo po izgotovljenii obrazcov iz drevesiny*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost“, Moskva.
- Ivanov Ju. M., 1960: *Fizičeskie sostojania i reologičeskie svojstva drevesiny*. *Voprosy lesovedenija i lesovodstva*, Moskva.
- Ivanov V. F., 1950: *Problemy dolgovečnosti derevjannykh konstrukciji*. Moskva.
- Jacenko – Chmielevskij A. A., 1954: *Osnovy I metody anatomičeskogo issledovanija drevesiny*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost“, Moskva.
- Jayne B. A., 1972: *Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials; Orthotropic elasticity*. Syracuse Univ. Press, Syracuse NY.
- Johnson A. I., 1953: *Strength, Safety and Economical Dimensions of Structures*. Swedish State Committee for Building Research, Bulletin Nr 22.
- Kokociński W., 2002: *Anatomia drewna*. Wyd. Prodruk, Poznań.

- Kollman F. P., 1962: *Über das rheologische Verhalten von Buchenholz verschiedener Feuchtigkeit bei Druckbeanspruchung längs der Faser*. Materialprüfungen, Nr 4 (9).
- Kollman F. P., 1967: *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einen anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*. VDJ, nr 520, Berlin.
- Kollman F. P., Cote' W. A., 1968: *Principles of Wood Science and Technology*. Vol. I Solid Wood. Springer Verlag, New York.
- Kontorova T. A., 1943: *Ob odnom iz priloženij statističeskoj teorii masštabnogo faktora*. Žurnal tehničeskoj fizyki, t. 13, Nr 6.
- Kontorova T. A., 1946: *Statističeskaja teorija masštabnogo faktora*. Moskva.
- Kopač J., Šali S., 2003: *Wood: an important material in manufacturing technology*. Journal of Materials Processing Technology, 133.
- Kozak R., 1963: *Konstrukcje drewniane*. PWN, Warszawa – Poznań.
- Kozakiewicz P., 2002: *Badanie właściwości mechanicznych tarcicy konstrukcyjnej charakteryzujących kohezję poprzeczną drewna sękatego*. Praca doktorska SGGW, Warszawa.
- Krasulin N. N., 1962: *K voprosu o deformativnosti drevesiny sosny pri sžatii poperek volokon. Stroenie i fizičeskie svojstva drevesiny*. Trudy Instituta Lesa i Drevesiny, Akademia Nauk SSSR, t. 51, Moskva – Leningrad.
- Krzosek S., 1998: *Badanie gęstości jako kryterium wytrzymałościowej jakości iglastej tarcicy konstrukcyjnej*. Praca doktorska SGGW, Warszawa.
- Krzosek S., 2009: *Wytrzymałościowe sortowanie polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej różnymi metodami*. Rozprawy naukowe i monografie, wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Krzysik F., 1978: *Nauka o drewnie*. PWN, Warszawa.
- Kubiak M., Rogaliński K., 1970: *Użytkowanie lasu, t. 1. Nauka o surowcu drzewnym*. PWRiL, Warszawa.
- Kubiak M., Laurow Z., 1994: *Surowiec drzewny*, Fundacja rozwój SGGW, Warszawa.
- Lam F., 1987: *Length Effects on Tension and Compression*. Forintek, Vancouver, Canada.
- Lam F., 1990: *Effect of Length on the Tensile Strength of Lumber*. Forintek, Vancouver, Canada.
- Leontev N. L., 1957: *Uprugie deformacii drevesiny*. Goslesbumisdat, Moskva.

Leontev N. L., 1970: *Technika ispytanij drevesiny*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost”, Moskva.

Łapka M., Szyber J., 2007: *Metodyczne aspekty badań wytrzymałości drewna sosnowego na ścinanie wzdłuż włókien*. Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Technika i technologia w leśnictwie polskim”. Monografia wydana z okazji 50-lecia Zakładu Mechanizacji Leśnictwa, ss.183, SGGW Warszawa; str. 52-56.

Madsen B., 1973: *Duration of Load Tests for Dry Lumber in Bending*. Forest Products Journ., 23.

Madsen B., 1990: *Length Effects in 38 mm Spruce – Pine – Fir Dimension Lumber*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 17, Nr 2.

Madsen B., 1992: *Size Effect in Hem – Fir Lumber*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, Nr 4.

Madsen B., 1992: *Structural Behaviour of Timber*. Timber Engineering LTD, North Vancouver, Canada.

Madsen B., Barrett I. D., 1976: *Lifetime of loaded wood – a Viscoelastic crack theory*. Build. Mat. Lab., Techn. Univ., Denmark, Tech. Report 149.

Madsen B., Buchanan A. H., 1986: *Size Effects in Timber Explained by a Modified Weakest Link Theory*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 13, Nr 2.

Madsen B., Momoi M., 1991: *Size Effects Occurring in Defect – Free Spruce – Pine – Fir Bending Specimens*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 11.

Madsen B., Nielsen P. C., 1976: *In – Grade Testing: Size Investigation on Lumber Subjected to Bending*. Structural Research Series Report, Nr 15, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Madsen B., Nielsen P. C., 1978: *In – Grade Testing: Bending Test in Canada 1977 - 1978*. Structural Research Series Report, Nr 15, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Madsen B., Nielsen P. C., 1978: *In – Grade Testing: Investigation of Test Parameters in Longitudinal Shear*. Structural Research Series Report, Nr 23. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Madsen B., Nielsen P. C., 1978: *In – Grade Testing: Tension tests in Canada*. National Lumber Grades Authority (N. L. G. A.), Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Mark R., 1968: *Coll Mechanics of Tracheids*. London.

- Mau T. J., 1976: *Time and Size Effects for Tension Perpendicular to Grain in Wood*. Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Miller R. B., 1999: *Wood handbook – Wood as an engineering material*. Forest Products Lab.
- Mindess S., Madsen B., 1986: *The Fracture of Wood Under Impact Loading*. *Materiaux et Construction*, Vol. 19, Nr 109.
- Mishnaevsky L., Qing H., 2008: *Micromechanical modeling of mechanical behavior and strength of wood: State – of – the art review*. *Computational Materials Science*, 44.
- Moses D. M., Pion H. G., 2003: *A three – dimensional model for bolted connections in wood*. *Canad. Journal Civil Eng.*, 30 (3).
- Moskaleva V. E., 1957: *Stroenie drevesiny i ego izmenenie pri fizičeskich i mehaničeskich vozdeystvach*. Moskva.
- Moskaleva V. E., 1962: *Stroenie kletčnoj obolowi drevesiny*. *Trudy Instituta Lesa i Drevesiny, Akademia Nauk SSSR*, t. 51, Moskva – Leningrad.
- Müller E., 2002: *Maschinelle Schnittholzsortierung – heute Zustand in Deutschland*. Seminarium „Produkcja i stosowanie tarcicy konstrukcyjnej sortowanej wytrzymałościowo”, SGGW, Maciejowo/Wismar.
- Nielsen L. F., 1985: *Wood as a Cracked Viscoelastic Material*. Forintek, Western Forest Products Laboratory, Vancouver, B. C., Canada.
- Nielsen L. F., 1987: *Fatigue of wood as related to defects and creep*. *Build. Mat. Lab.*, Techn. Univ., Denmark Tech. Report 170 B.
- Nielsen L. F., 1991: *Lifetime, Residual Strength and Quality of Wood – and other viscoelastic materials*. *Holz als Roh – u. Werkstoff*, 49.
- Nielsen L. F., 1992: *The Theory of Wood As a Cracked Visco – Elastic Material*. Timber Engineering LTD, North Vancouver, B. C., Canada.
- Nielsen L. F., Kousholt K., 1980: *Stress – Strength – Lifetime Relationship for Wood*. *Wood Science*, 12.
- Nowak T., 2003: *Wzmacnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. *Wiadomości Konserwatorskie*, Warszawa, 14, s. 21 – 27.
- Nowak T., 2007: *Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmacnianych przy użyciu CFRP*. Praca doktorska; Raport PRE nr 4/07, Politechnika Wrocławska, Wrocław.

- O'Halloran M. R., 1973: *A curvilinear stress – strain model for wood in compression*. Praca doktorska Colorado State Univ., Fort Collins.
- Patton – Mallory M. i inni, 1998: *Modeling bolted connections in wood: a three – dimensional finite element approach*. Journal Test Eval, 26 (2).
- Pedersen M. U. i inni, 2003: *A simple size effect model for tension perpendicular to the grain*. Wood Sci. Technol., 32 (2).
- Perełygin L. M., 1957: *Drevesinovedenie*. Izd. „Lesnaja promyšlennost”, Moskva.
- Perełygin L. M., Ugolev B. N., 1971: *Drevesinovedenie*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost”, Moskva.
- Peterson H., 1992: *Analysis of fracture propagation*. COST 508, Wood Mechanics, Workshop.
- Pizzo B. i inni, 2003: *Measuring the shear ratio of glued joints within the same specimen*. Holz Roh Werkst., 61 (4).
- PN-63/D-04117 – *Fizyczne i mechaniczne właściwości drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym*.
- PN-66/D-01000. *Wady drewna*. PKN, Warszawa, 1968.
- PN-75/D-04123. *Drewno. Oznaczanie modułu sprężystości przy zginaniu statycznym w strefie czystego zginania*.
- PN-75/D-96000 – *Tarcica iglasta ogólnego przeznaczenia*.
- PN-77/D-04101. *Drewno. Oznaczanie gęstości*.
- PN-77/D-04103. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne*.
- PN-77/D-04227. *Drewno. Ogólne wytyczne pobierania i przygotowania próbek*.
- PN-77/D-04229. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien*.
- PN-78/D-03001 – *Tarcica. Pomiar i obliczanie miąższości na podstawie grubości, szerokości, długości oraz ilości sztuk w partii*.
- PN-79/D-01011. *Drewno okrągłe. Wady*.
- PN-79/D-01012. *Tarcica. Wady*.
- PN-79/D-04102. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien*.

- PN-79/D-04105. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien.*
- PN-81/D-04107. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien.*
- PN-81/D-04108. *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien.*
- PN-82/D-94021. *Tarcica iglasta konstrukcyjna sortowana metodami wytrzymałościowymi.*
- PN-93/D-95000 – *Surowiec drzewny. Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie.*
- PN-B-03150:2000. *Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie.*
- PN-EN 518:2000. *Drewno konstrukcyjne. Sortowanie. Wymagania w odniesieniu do norm dotyczących sortowania wytrzymałościowego tarcicy metodą wizualną.*
- PN-EN 519:2000. *Konstrukcje drewniane. Sortowanie. Wymagania dla tarcicy sortowanej wytrzymałościowo metodą maszynową oraz dla maszyn sortujących.*
- PN-EN 338:2003. *Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości.*
- PN-EN 408:2004. *Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo. Oznaczanie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych (na elementach pełnowymiarowych).*
- PN-EN 13183-1:2004 – *Wilgotność sztuki tarcicy. Część 1: Oznaczanie wilgotności metodą suszarkowo – wagową.*
- PN-EN 13183-2:2004 – *Wilgotność sztuki tarcicy. Część 2: Oznaczanie wilgotności za pomocą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego.*
- Praca zbiorowa, 2004: *Siedliskowe podstawy hodowli lasu: załącznik do Zasad hodowli lasu.* Ośrodek Rozwojowo – Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Warszawa.
- Savkov E. J., 1962: *Pročnosť pilomaterialov.* Moskva.
- Savkov E. J., 1965: *Mechaničeskie svojstva drevesiny.* Moskva.
- Schneider M. H., Philips J. G., 1991: *Elasticity of wood and wood polymer composites in tension, compression and bending.* Wood Sci. Technol., 25 (5).



Schultrich B., Fahrman M., 1979: *Relation Between Defect Position in Bending and Strength Variance*. Journal of Materials Science 14.1080.

Sedrakjan Ja. G., 1958: *K statističeskoj teoriji pročnosti*. Erevan.

Serrano E., Gustafsson P. J., 1999: *Influence of bondline brittleness and defects on the strength of timber finger – joints*. Intern. Journal of Adhesion and Adhesives, 10.

Smólski J., Stępień P.: *Kryteria konserwatorskie doboru rozwiązań inżynierskich w zabytkach architektury – w świetle doktryny i praktyki konserwacji*. IV Konferencja Naukowo – Techniczna. Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 1998, s. 63 – 71.

Sobolev Ju. S., 1956: *K voprosu o postojannyh uprugosti drevesiny*. MLTI, Moskva.

Sobolev Ju. S., 1958: *Issledovanie postojannyh uprugosti drevesiny*. Lesoinżynernoe delo, Nr 4.

Sobolev Ju. S., 1959: *Issledovanie uprugich postojannyh drevesiny*. Disertacija, Moskva.

Sobolev Ju. S., 1960: *O masšabnom effekte i processe dlitel'nogo razrušenija*. Zavodskaja laboratorija, Nr 9.

Sobolev Ju. S., 1975: *Zavisimost' predela pročnosti materiala kleenych derevjannyh konstrukcji ot absoljutnyh razmerov obrazcow pri izgibe*. Mehaničeskaja obrabotka drevesiny, Nr 5.

Sobolev Ju. S., 1976: *Vlijanie masšabnogo faktora na značenia predela pročnosti kleenoj drevesiny pri sžatii*. Lesnoj žurnal, Nr 6.

Sobolev Ju. S., 1979: *Drevesina kak konstrukcionnyj material*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost'”, Moskva.

Smith I., Landis E., Gong M., 2003: *Fracture and fatigue in wood*. Wiley, Chichester U. K.

Smith I., Vasic S., 2003: *Fracture behavior of softwood*. Mechanics of Materials, 35.

Stanzl – Tschegg S. E., Tan D. M., Tschegg E. K., 1995: *New splitting method for wood fracture characterisation*. Wood Sci. Technol., 29.

Steiger R., 1996: *Mechanische Eigenschaften von Schwiezar Fichten – Bauholz bei Biege -, Zug -, Druck – und kombinierter M/N – Beanspruchung*. Research Report 221, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.

Steiger R., Arnold M., 2009: *Strength grading of Norway spruce structural timber*. Wood Sci. Technol., 43.

- Steiger R., Fontana M., 2005: *Bending moment and axial force interacting on solid timber beams*. Mater. Struct. 38 (279).
- Szczepaniak J., Sława – Neyman St., 2000: *Jakość sosnowego surowca okrągłego i tarcicy w świetle wymagań norm polskich i projektów norm europejskich*. Maszynopis, Instytut Technologii Drewna, Poznań.
- Sztyber J., 2004 a: *Wpływ niektórych czynników na wyboczenie sosny*, Inżynieria Rolnicza nr 2 (62).
- Sztyber J., 2004 a: *Niektóre aspekty śniegołomów w młodszych drzewostanach sosnowych*, Inżynieria Rolnicza nr 2 (62).
- Šapov N. P., 1960: *K voprosu o masštabnom faktore*. Zavodskaja laboratorja, Nr 3.
- Tabiei A., Wu J., 2000: *Three – dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood*. Composite Structures, 50.
- Thibaut B., Gril. J., Fournier M., 2001: *Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story*. A cad Sci. Press, Paris, t. 329.
- Toratti T., 1992: *Creep of timber beams in variable environment*. Helsinki Univ. of Technology, Finland.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A., 1990: *Regionalizacja przyrodniczo – leśna na podstawach ekologiczno – fizjograficznych*. PWRiL Warszawa.
- Trustrum K., 1987: *Estimation of the Weibull Modulus from Bending Tests Using Both the Fracture Position and the Failure Stress*. Journal of Materials Science 6.
- Tsoumis G., 1991: *Science and technology of Wood*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Ugolev B. N., 1965: *Ispytanija drevesiny i drevesnych materialov*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost’”, Moskva.
- Ugolev B. N., 1971: *Deformativnost’ drevesiny i naprjaženijä pri suške*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost’”, Moskva.
- Ugolev B. N., 1975: *Drevesinovedenie c ocnovami lesnogo tovarowedenia*. Izd. „Lesnaja Promyšlennost’”, Moskva.
- Vasic S., 2000: *Applications of fracture mechanics to wood*. University of New Brunswick, Fredericton NB, Canada.
- Vasic S., 2002: *Bridging crack model for fracture of spruce*. Engineering Fracture Mechanics, 69.

- Vasic S., Ceccotti A., 2009: *Influence of intermediate deformation rates in softwoods characterized with fracture resistance R – curves*. Wood Sci. Technol., 43.
- Vasic S., Smith I., Landis E., 2005: *Finite element techniques and models for wood fracture mechanics*. Wood Sci. Technol., 39.
- Vichrov V. E., 1959: *Diagnostičeskie priznaki drevesiny glavnijšich lesochozjajstvennych i lesopromyšlennyh porod SSSR*. Izd. Akademia Nauk SSSR, Moskva.
- Volkov S. D., 1960: *O kinetyke razrušenija i masšabnom efekte*. Zavodskaja laboratorija, Nr 3.
- Wanin S., 1953: *Nauka o drewnie*. PWRiL, Warszawa.
- Weibull W., 1939: *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Proc. Royal Swed. Institut Engng. Research, Nr 141, Stockholm.
- Weibull W., 1939a: *The Phenomeon of Rupture in Solids*. Proc. Royal Swed. Inst. Eng. Research, Nr 153, Stockholm.
- Wood L. W., 1951: *Relation of Strength of Wood to Duration of Load*. Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Departament of Agriculture, Report 1916, reprinted 1962.
- Ylinen A., 1942: *Über den Einfluss der Proberkörper – grösse auf die Biegefestigkeit des Holzes*. Holz als Roh und Werkstoff, Bd. 5, Nr 9.
- Zalph B. L., Mc Lain T. E., 1992: *Strength of wood beams with filleted interior notches: a new model*. Wood Fiber Sci. 24 (2).
- Znamenskij E. M., 1935: *Vlijanie razmerov poperečnogo sečenija na krepost' derevjannyh elementom pri izgibe*. Stritel', Nr 13.
- Żaboklicki A.: *Wzmacnianie konstrukcji drewnianych zwłaszcza zabytkowych za pomocą kompozytów polimerowych*. Sympozjum Naukowe, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin – Międzyzdroje, 1996, s. 353 – 360.
- Żaboklicki A.: *Rehabilitacja drewnianych konstrukcji w zabytkowych obiektach architektury i budownictwa*. Konferencja Naukowo – Techniczna. Konserwacja, wzmacnianie i modernizacja budowlanych obiektów historycznych i współczesnych, Kielce 2001, s. 163 – 179.