

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WYTRZYMAŁOŚCIĄ DREWNA NA ROZCIĄGANIE I ŚCISKANIE WZDŁUŻ WŁÓKIEN. WPŁYW WILGOTNOŚCI

Jan Raczkowski, Sławomir Jakubów i Andrzej Majchrzak

Katedra Nauki o Drewnie Akademii Rolniczej w Poznaniu

Przeprowadzono porównawcze badania nad wpływem wilgotności drewna na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien. Doświadczenia wykonano na geometrycznie podobnych próbkach o jednakowym polu przekroju poprzecznego w części roboczej próbek. Do badań użyto drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.), dębu (*Quercus petraea* Liebl.) i buka (*Fagus silvatica* L.).

Stosunek wytrzymałości na rozciąganie $\sigma^+_{\max}$ do wytrzymałości na ściskanie $\sigma^-_{\max}$ wzdłuż włókien praktycznie nie zależy od gatunku drewna. Wartość ilorazu $\sigma^+_{\max}/\sigma^-_{\max}$ zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności w sposób prostoliniowy i wynosi przeciętnie 1,25 dla drewna zupełnie suchego ($W=0\%$), 2 dla drewna powietrznosuchego ($W=12\%$) i 4 dla drewna mokrego ($W>30\%$). Odształcenie w chwili zniszczenia praktycznie nie zależy od gatunku drewna i wynosi w próbie rozciągania od 0,5 do 0,8%, a w próbie ściskania wzdłuż włókien od 0,9 do 1,3%. Ze wzrostem wilgotności drewna odształcenie w chwili zniszczenia podczas rozciągania wykazuje tendencję do zwiększania się, odształcenie zaś podczas ściskania ma skłonność do pewnego zmniejszania się.

WPROWADZENIE

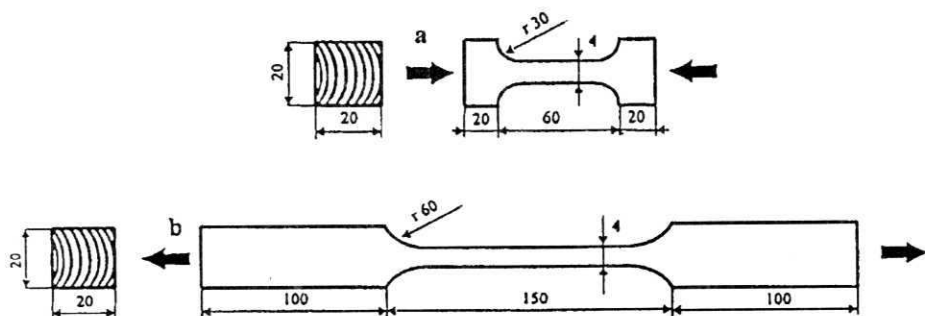
Drewno odznacza się, jak wiadomo, zróżnicowaną wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie w kierunku równoległym do przebiegu włókien. Z danych liczbowych zestawionych w znanej monografii Kollmann'a [11], a obejmujących 40 gatunków, wynika, że wytrzymałość drewna na rozciąganie w stanie powietrznosuchym ($W=12\ldots 15\%$) jest średnio 2-krotnie wyższa od wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien. Nierówność wytrzymałości na jednokierunkowe rozciąganie i ściskanie uznać można za osobliwą cechę drewna. Większość bowiem naturalnych i sztucznych materiałów, a mianowicie skały, materiały ceramiczne, metale, kości i in. odznacza się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż na rozciąganie w danym kierunku [4, 6, 7]. Należy zauważyć,

że przytoczona wyżej relacja pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien dotyczy wartości średnich otrzymanych przez różnych autorów, na różnym materiale drzewnym i na różnych próbkach użytych w próbie rozciągania i ściskania. Porównywalność tych danych doświadczalnych jest przeto ograniczona. Wynika więc stąd niedostatek porównywalnych danych liczbowych dotyczących wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien, otrzymanych na tym samym materiale drzewnym. Ponadto, stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie jest uzależniony od wilgotności drewna w chwili badania [12]. Jednakże charakter tej zależności nie jest dotychczas bliżej poznany. W tym stanie rzeczy uznano za celowe podjęcie badań nad pełniejszym poznaniem wpływu wilgotności drewna na wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien na próbkach o zbliżonym kształcie.

METODYKA BADAŃ

Do doświadczeń wybrano drewno sosny (*Pinus sylvestris* L.), dębu (*Quercus petraea* Liebl.) i buka (*Fagus silvatica* L.) jako typowych przedstawicieli trzech różnych grup strukturalnych. Gęstość w stanie zupełnie suchym przeznaczonego do badań drewna twardej części przekroju poprzecznego pnia wynosiła: dla sosny 520 ± 24 , dla dębu 650 ± 27 i dla buka 760 ± 31 kg/m³.

Próbę rozciągania wzdłuż włókien wykonano na standardowych próbkach przewężonych w części roboczej o wymiarach 20x20x350 mm [14]. Próbę zaś ściskania wzdłuż włókien przeprowadzono na próbkach podobnych do poprzednich, w kształcie dwustronnej łopatki o wymiarach 20x20x100 mm (rys. 1).



Rys. 1. Próbkę użyte do oznaczania wytrzymałości drewna na ściskanie (a) i rozciąganie (b) wzdłuż włókien

Fig. 1. Wood specimens used for tests in compression (a) and tension (b) along the grain

Próbka taka odznacza się względnie jednorodnym stanem naprężeń i zlokalizowanym miejscem zniszczenia. Wcześniej próbki o podobnym kształcie stosowano w próbach pełzania drewna wzdłuż włókien [10] i w badaniach ciśnienia

pęcznienia drewna wzdłuż włókien [13]. Przy doborze próbek do badań kierowano się głównie podobieństwem kształtu i identycznością pola przekroju poprzecznego w części roboczej próbek rozciąganych i ściskanych.

Doświadczenia metodyczne na temat wpływu kształtu i wymiarów próbek na wytrzymałość drewna badanych gatunków na ściskanie wykazały, że wytrzymałość próbek przewężonych jest nieznacznie (poniżej 10%) obniżona w porównaniu z próbkami prostopadłościennymi o wymiarach 30x20x30 mm i 20x20x60 mm.

Badania postanowiono przeprowadzić na próbkach o zróżnicowanej wilgotności, a mianowicie o wilgotności 0, 6, 12, 18 i >30%. Stosownie do tego założenia próbki klimatyzowano przez 4 miesiące nad odpowiednimi roztworami nasyconych soli [8]. Próbki zaś przeznaczone do badań w stanie zupełnie suchym suszono w temperaturze $103 \pm 2^\circ\text{C}$ do stałej masy. Próbki natomiast badane w stanie mokrym ($W > 30\%$) początkowo nawilżano nad wodą, a potem przechowywano w wodzie. W wyniku klimatyzowania osiągnięto założone wilgotności równowagowe z wyjątkiem próbek przeznaczonych do badania przy $W=6\%$, które osiągnęły wilgotność zbliżoną do $W=8\%$. Próbki badane w stanie mokrym miały wilgotność w przedziale 70...95%.

Próby rozciągania i ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej FPZ-100 (produkcji b. NRD). Czas trwania prób wynosił 1 min. Przebieg prób utrwalano w układzie obciążenie-odkształcenie na rejestratorze maszyny wytrzymałościowej. Oprócz tego dokonywano pomiarów odkształceń w roboczej, przewężonej części próbek za pomocą indukcyjnego czujnika przemieszczeń o zakresie pomiarowym ± 1 mm i czułości 0,001 mm. Czujnik ten był połączony z miernikiem i rejestratorem X-Y (Tesla-Brno). Baza tensometru wynosiła 20 mm w próbie ściskania i 50 mm w próbie rozciągania.

WYNIKI I ICH ANALIZA

Bezpośrednie wyniki doświadczeń zestawiono w tabeli 1. Dane tej tabeli stanowią wartości średnie dla danej wilgotności z 7 próbek dla sosny, z 5 próbek dla dębu oraz dla buka z 9 próbek przy ściskaniu i 8 próbek przy rozciąganiu. Zmienność wartości liczbowych wytrzymałości na rozciąganie wynosi $V\% = 8,5$ (3,9...14,2)%, na ściskanie zaś $V\% = 6,3$ (4,2...10,1)%. Z danych tabeli 1 wynika, że badane drewno dębu odznaczało się obniżoną wytrzymałością na rozciąganie, a zwłaszcza na ściskanie w porównaniu z wartościami średnimi dla drewna tego gatunku [11]. Badane drewno dębu ze względu na wąskostoistość (średnia szerokość słoików 2 mm) zaliczyć można do kategorii tzw. dębiny miękkiej, odznaczającej się względnie niską wytrzymałością. Fakt ten potwierdzają obrazy zniszczenia próbek podczas rozciągania, które odznaczały się wybitnie kruchym przełomem.

Wpływ wilgotności na przebieg względnej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie wzdłuż włókien przedstawiono na rys. 2. Wytrzymałość w danym wypadku obliczono w stosunku do wytrzymałości przy wilgotności 12%, którą przyjęto za 100%. Z przedstawionych na tym rysunku krzywych wyrównanych

wynika, zgodnie z oczekiwaniem, że zarówno desorpcyjne wzmocnienie drewna przy spadku wilgotności poniżej 12% jak i adsorpcyjne osłabienie drewna przy wzroście wilgotności powyżej 12% jest w próbie ściskania wzdłuż włókien znacznie większe aniżeli w próbie rozciągania wzdłuż włókien. W wypadku rozciągania wykonane doświadczenia potwierdziły znany fakt (z wyjątkiem drewna sosny), że maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien występuje przy wilgotności różnej od zera [11, 16].

Tabela 1
Table 1

Zależność wytrzymałości drewna niektórych gatunków na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien
Dependence of the strength of wood in tension and compression along the grain upon the moisture content for some wood species

Gatunek drewna Wood species	Wilgotność drewna Moisture content	Wytrzymałość Strength	
		na rozciąganie in tension $\sigma^+_{\max \pm s}$	na ściskanie in compression $\sigma^-_{\max \pm s}$
	(%)	(N/mm ²)	
Sosna	0	125,1 $\pm$ 10,1*	86,8 $\pm$ 5,9
	8	114,6 $\pm$ 5,8	64,7 $\pm$ 3,6
Pine	12	104,0 $\pm$ 4,0	53,8 $\pm$ 5,4
	18	94,5 $\pm$ 6,8	38,2 $\pm$ 2,1
	>30	84,1 $\pm$ 3,3	22,6 $\pm$ 1,7
Dąb	0	72,9 $\pm$ 8,2	64,9 $\pm$ 2,7
	8	86,1 $\pm$ 6,2	50,7 $\pm$ 3,6
Oak	12	75,7 $\pm$ 4,5	37,3 $\pm$ 2,4
	18	81,3 $\pm$ 5,5	33,4 $\pm$ 1,5
	>30	55,2 $\pm$ 7,7	18,2 $\pm$ 0,8
Buk	0	132,5 $\pm$ 18,6	100,9 $\pm$ 4,7
Beech	8	140,7 $\pm$ 14,2	71,1 $\pm$ 3,4
	12	135,2 $\pm$ 12,5	56,8 $\pm$ 5,1
	18	127,6 $\pm$ 16,0	38,8 $\pm$ 2,8
	>30	93,0 $\pm$ 7,8	22,3 $\pm$ 1,2

*) $x \pm$ odchylenie standardowe, standard deviation

Zależność stosunku wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie $\sigma^+_{\max} / \sigma^-_{\max}$ drewna badanych gatunków jest prostoliniowa przy wysokim współczynniku korelacji i wynosi:

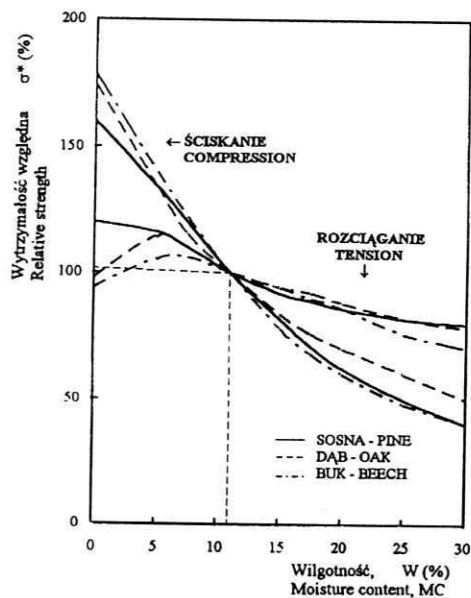
dla sosny $y = 1,212 + 0,079x$, $r = 0,987$;

dla dębu $y = 1,177 + 0,061x$, $r = 0,981$;

dla buka $y = 1,321 + 0,099x$, $r = 0,989$.

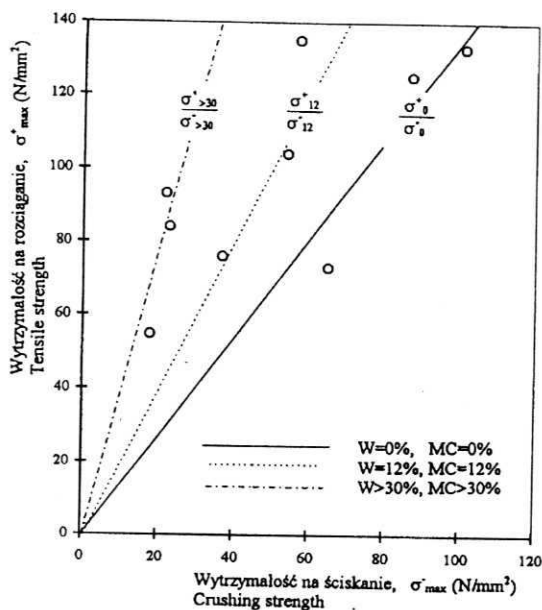
Na wysoką zależność ilorazu $\sigma^+_{\max} / \sigma^-_{\max}$ od wilgotności zwrócił już wcześniej uwagę Kollmann [12] na przykładzie drewna świerka i buka bez bliższego wszakże ustalenia charakteru tej zależności.

Wartości liczbowe stosunku wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien mogą zawierać się w przedziale od ok. 1,25 dla drewna zupełnie suchego do ok. 4 dla drewna mokrego (rys. 3). Dla drewna powietrznosuchego wartość wspomnianego stosunku wynosi 2. Uwidoczniony



Rys. 2. Zależność względnej wytrzymałości drewna na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien od wilgotności

Fig. 2. Dependence of the relative strength of wood in tension and compression along the grain upon moisture content



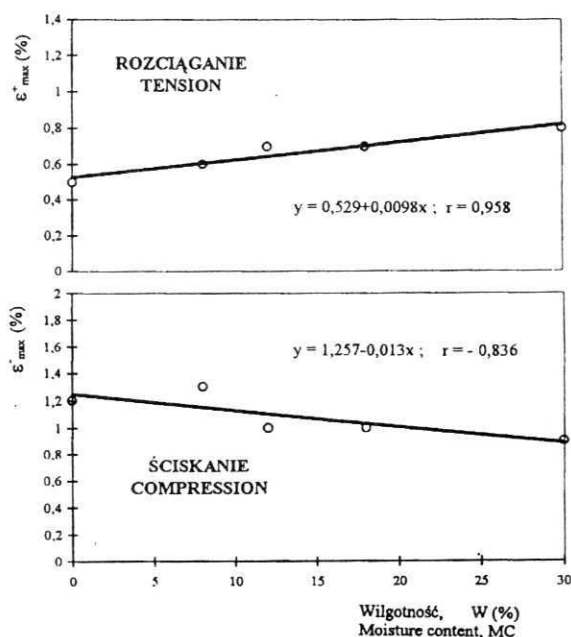
Rys. 3. Zależność między wytrzymałością na rozciąganie $\sigma_{\max}^+$ i ściskanie $\sigma_{\max}$ wzdłuż włókien drewna w stanie zupełnie suchym ($W=0\%$), w stanie powietrznosuchym ($W=12\%$) i w stanie mokrym ($W>30\%$)

Fig. 3. Relationship between tensile strength $\sigma_{\max}^+$ and compressive strength $\sigma_{\max}$ along the grain for oven-dry wood ($MC=0\%$), for air-dry wood ($MC=12\%$) and for wet wood ($MC>30\%$)

na rys. 3 wykres po jego rozbudowie o dalsze dane doświadczalne, będzie mógł być wykorzystywany do szacowania wytrzymałości na rozciąganie przy znanej wytrzymałości na ściskanie dla danej wilgotności i odwrotnie.

Odształcenie w chwili zniszczenia próbek praktycznie nie zależy od gatunku drewna, a więc i od gęstości. Odształcenie przy zniszczeniu mieści się w przedziale od 0,5 do 0,8% dla rozciągania, a dla ściskania jest nieco większe i zawiera się w granicach od 0,9 do 1,3%. Rezultaty te zdają się być wiarygodne, bowiem już wcześniejsze badania Kollmann'a [11] wykazały na przykładzie sosny o wilgotności 9...15%, że odkształcenie przy zniszczeniu podczas rozciągania i ściskania wzdłuż włókien wynosi ok. 1 %. Wyniki badań Ansel'a [2] zdają się potwierdzać spostrzeżenia o braku zależności deformacji w chwili zniszczenia od gatunku drewna. Wspomniany autor stwierdził bowiem, że odkształcenie niszczące podczas rozciągania wzdłuż włókien wynosi średnio $0,8 \pm 0,1\%$ dla drewna *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga* sp. i *Aurakaria* sp.. W badaniach nad rozciąganiem drewna eukaliptusa (*Eucalyptus pilularis*) w poprzek włókien w stanie mokrym również nie stwierdzono zależności między odkształceniem przy zniszczeniu i gęstością drewna [1].

Warto zwrócić uwagę na wynikające z przeprowadzonych doświadczeń tendencje dotyczące wpływu wilgotności drewna na odkształcenie przy znisz-



Rys. 4. Wpływ wilgotności drewna na odkształcenia w chwili zniszczenia próbek podczas rozciągania $\epsilon_{\max}^+$ i ściskania $\epsilon_{\max}^-$ wzdłuż włókien

Fig. 4. Effect of moisture content on the deformation of the wood samples at failure during tension $\epsilon_{\max}^+$ and compression $\epsilon_{\max}^-$ tests along the grain

czeniu podczas rozciągania i ściskania wzdłuż włókien (rys. 4). Odształcenie w chwili zniszczenia podczas rozciągania wzdłuż włókien jest pozytywnie

skorelowane z wilgotnością ($r = 0,958$), zaś korelacja podczas ściskania ma charakter negatywny ($r = -0,836$). Inaczej mówiąc, przy wzroście wilgotności odkształcenie w chwili zniszczenia w próbie rozciągania wzdłuż włókien wykazuje wyraźną skłonność do zwiększania się podczas gdy, odkształcenia w chwili zniszczenia w próbie ściskania mają tendencję do obniżania się. Spostrzeżenia te należy traktować z ostrożnością do czasu ich weryfikacji na obszerniejszym materiale doświadczalnym. Niedostatek danych literaturowych o wpływie wilgotności drewna na wartość odkształceń w chwili zniszczenia utrudnia jakiegokolwiek konfrontacje otrzymanych wyników.

Czynnikiem determinującym nierówność wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie drewna wzdłuż włókien jest, jak wynika z przedstawionych badań, wilgotność drewna. Przy wilgotności powyżej punktu nasycenia włókien wartość ilorazu wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie wzdłuż włókien wynosi ok. 4. Inaczej mówiąc, w mokrej tkance drzewnej rosnących drzew wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien wynosi tylko 1/4 wytrzymałości na rozciąganie w kierunku równoległym do przebiegu włókien. Zdaje się stąd wynikać, iż z biomechanicznego punktu widzenia tkanka drzewna orientuje się przede wszystkim na sprostanie działaniu naprężeń rozciągających, które są bardziej niebezpieczne dla zachowania całości pnia drzewa aniżeli naprężenia ściskające. Naprężenia ściskające bowiem nawet jeśli spowodują uszkodzenie tkanki drzewnej to ma ono charakter lokalny i nie rozprzestrzenia się na cały przekrój poprzeczny pnia drzewa i nie powoduje rozdzielczego zniszczenia pnia. Drzewa oprócz tego mają zdolność zarastania powstałych wskutek lokalnego ściskania uszkodzeń tkanki [15]. W miejscach utraty stateczności komórek drewna wskutek ściskania, mikrofibryle ściany komórkowej nadal zachowują całość wzdłuż swej osi podłużnej. Potwierdzają to doświadczenia nad wstępnym ściskaniem drewna wzdłuż włókien naprężeniem zbliżonym do niszczącego, które przy powtórnym rozciąganiu zachowuje ponad 90% pierwotnej wytrzymałości [5].

Drzewa odznaczają się ponadto szczególną osobliwością polegającą na tym, że pień drzew znajduje się w stanie wstępnie naprężonym [3]. Zewnętrzne, przyobwodowe części pnia są w kierunku podłużnym rozciągane, podczas gdy wewnętrzne części pnia są ściskane. W tym stanie drzewo w porównaniu z pniem wstępnie nie naprężonym, zyskuje około 2-krotne obniżenie maksymalnych naprężeń ściskających i w ten sposób podwaja efektywną wytrzymałość pnia na zginanie [9]. Co prawda wzrastają przy tym maksymalne naprężenia rozciągające, którym wszakże drewno łatwo może sprostać, jak wynika z przedstawionych badań.

WNIOSKI

1. Stosunek wytrzymałości na rozciąganie $\sigma^+_{\max}$ do wytrzymałości na ściskanie $\sigma^-_{\max}$ wzdłuż włókien praktycznie nie zależy od gatunku drewna.

2. Wartość ilorazu $\sigma^+_{\max}/\sigma^-_{\max}$ zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności drewna i wynosi przeciętnie 1,25 dla drewna zupełnie suchego ($W=0\%$), 2 dla drewna powietrznosuchego ($W=12\%$) i 4 dla drewna mokrego ($W>30\%$).

3. Odkształcenie w chwili zniszczenia praktycznie nie zależy od gatunku drewna i wynosi w próbie rozciągania od 0,5 do 0,8%, a w próbie ściskania wzdłuż włókien od 0,9 do 1,3%.

4. Ze wzrostem wilgotności drewna odkształcenie w chwili zniszczenia podczas rozciągania wykazuje skłonność do zwiększania się ($r = 0,958$), podczas ściskania zaś ma tendencję do pewnego zmniejszania się ($r = -0,836$).

Praca wpłynęła do Redakcji w czerwcu 1995

LITERATURA

1. Alexiou, P.N., Shouyue, Z., Marchant, J.F.: Elastic properties of Eucalyptus pilularis Sm. perpendicular to the grain. I. In tension. *Holzforsch.*, 1991, 45(1), 1-6.
2. Ansel, M.P.: Acoustic emission for softwood in tension. *Wood Sci. and Technol.*, 1982, 16(1), 35-58.
3. Archer, R.R.: Growth stresses and strains in trees. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin et al. 1986.
4. Bodig, J., Jayne, B.A.: Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Comp., New York et al. 1982.
5. Dinwoodie, J.M.: Failure in timber. Part 3: The effect of longitudinal compression on some mechanical properties. *Wood Sci. and Technol.*, 1978, 12:271-285.
6. Dinwoodie, J.M.: Timber, its nature and behaviour. Van Nostrand Reinhold Comp., New York et al. 1981.
7. Fung, Y.C.: Biomechanics. Mechanical properties of living tissues. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin 1981.
8. Gal, S.: Methodik der Wasserdampf - Sorptionsmessungen. Springer-Verlag, Berlin et al. 1967.
9. Gordon, J.M.: Structures, or why things don't fall down. Penguin Books, Harmondsworth 1978.
10. Keith, C.T.: The mechanical behaviour of wood in longitudinal compression. *Wood Sci.*, 1972, 4(4):234-244.
11. Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd. I. Springer-Verlag, Berlin et al. 1951.
12. Kollmann, F.: Beziehungen zwischen rheologischen und Sorptions Eigenschaften (am Beispiel Holz). *Rheologia Acta* 1964, 3(4):260-270.
13. Krauss, A., Raczkowski, J.: The swelling pressure of wood and cell wall in direction parallel to the grain. *European Sci. Coll. on the Mechanical Behaviour of Wood*. Bordeaux 1988, pp. 1-9.
14. Krzysik, F.: Nauka o drewnie. PWRiL, Warszawa 1974.
15. Trendelenburg, R.: Über Faserschtauchung in Holz und ihre Überwallung durch den Baum. *Holz als Roh- und Werkst.*, 1940, 3(7/8):209-221.
16. Wilcox, W.W., Botsai, E.E., Kubler, H.: Wood as a building material. John Wiley & Sons Inc., New York et al. 1991.

RELATIONSHIP BETWEEN TENSILE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF WOOD ALONG THE GRAIN. INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT

Summary

Comparative studies were made on wood moisture content (MC) effect on wood tension and compression along the grain. The experiments were conducted on geometrically similar specimens of equal cross-sections in specimen's working zone. For testing there were selected: pine wood (*Pinus sylvestris* L.), oak wood (*Quercus petraea* Liebl.) and beech wood (*Fagus silvatica* L.).

The ratio of tensile strength $\sigma_{\max}^+$ to compressive strength $\sigma_{\max}^-$ along the grain practically does not depend on wood species. The value of quotient: $\sigma_{\max}^+ / \sigma_{\max}^-$ increases in linear manner with wood MC increase is equal 1.25 on average for oven dry wood (MC=0%), 2 for air-dry wood (MC=12%) and 4 for green wood (MC>30%). Deformation at failure practically does not depend on wood species and is equal in tension test: 0.5 to 0.8%, and 0.9 to 1.3% in along the grain compression test. While wood MC is increasing the deformation at failure in tension test tends to increasing and deformation in compression test reveals some decreasing tendency.

Adres autorów:

Prof. dr hab. Jan Raczkowski

Mgr inż. Sławomir Jakubów

Mgr inż. Andrzej Majchrzak

Akademia Rolnicza w Poznaniu

Katedra Nauki o Drewnie

60-627 Poznań, ul. Wojska Polskiego 38/42