ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK XLVI NR 2 (161) 2005

Lesław Kyzioł

OPIS WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH DREWNA MODYFIKOWANEGO PMM

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono opis właściwości wytrzymałościowych drewna przy jednoosiowym rozciąganiu w zależności od kąta α i zawartości polimeru. Do opisu wytrzymałości stosowano kryteria wytrzymałości dla materiałów anizotropowych typu Misesa i Tsai-W. Do weryfikacji poprawności opisu tych kryteriów stosowano test statystyczny F-Snedocora.

WSTĘP

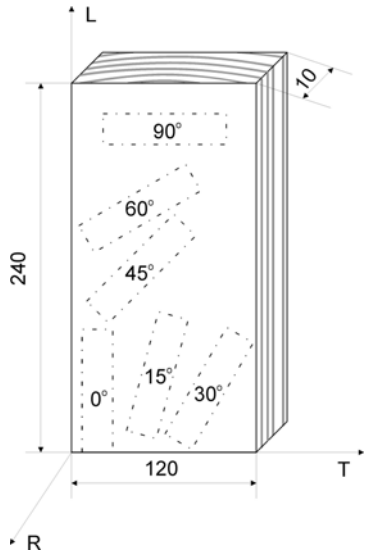
W większości prac autorzy badają wytrzymałość drewna w zależności tylko od kąta α albo od zawartości polimeru. Wielu autorów, a wśród nich [1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 15], podaje w swoich opracowaniach, że właściwości drewna modyfikowanego, takie jak np. wytrzymałość na ściskanie wzdłuż i w poprzek włókien, moduł sprężystości wzdłużnej, wzrastają proporcjonalnie do ilości substancji modyfikującej wprowadzonej do drewna. Wszystkich zmian właściwości mechanicznych drewna następujących pod wpływem modyfikacji nie można w pełni przewidywać bez przeprowadzenia konkretnych badań.

Celem pracy jest próba opisu właściwości wytrzymałościowych drewna przy jednoosiowym rozciąganiu w zależności od kąta α i zawartości polimeru. Do opisu wytrzymałości stosowano kryteria wytrzymałości dla materiałów anizotropowych typu Misesa i Tsai-W. Do weryfikacji poprawności opisu tych kryteriów stosowano test statystyczny F-Snedocora.

MATERIAŁ I PRZEBIEG BADAŃ

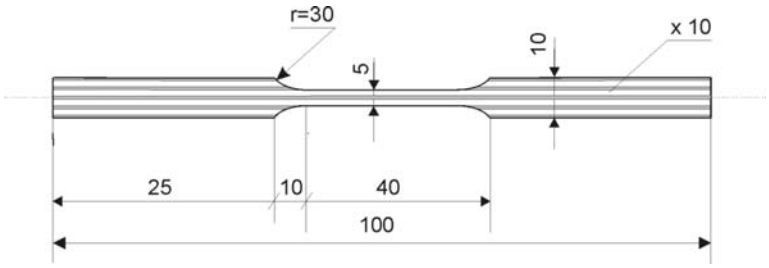
Bardzo istotnym zagadnieniem jest określenie wpływu zawartości PMM w kompozycie na właściwości wytrzymałościowe na rozciąganie, a także, jak zmiana kąta zawartego pomiędzy kierunkiem działającego obciążenia, a kierunkiem włókien wpływa na jego wytrzymałość.

W tym celu wykonano próbki z graniaka pozbawionego jakichkolwiek wad w postaci sęków, zgnilizn itp. Graniaki drewna były sezonowane i naturalnie suszone w temperaturze 22 (±2) °C i wilgotności 75% w warunkach laboratoryjnych. Z graniaka o wymiarach 240x120x10 (LxTxR) wykonano próbki do badań.



Rys. 1. Pozyskanie próbek z graniaka do określania właściwości wytrzymałościowych na rozciąganie w zależności od kąta odchylenia włókien od kierunku wzdłużnego

Próbki wyrabiano z zachowaniem orientacji ich wymiaru długości pod kątem α = 15, 30, 45, 60 i 90° w stosunku do kierunku wzdłużnego włókien (rys. 1.). Zakres badań dotyczył określenia wytrzymałości na rozciąganie drewna modyfikowanego w zależności od zawartości polimeru w kompozycie oraz kąta (α = 15, 30, 45, 60 i 90°) zawartego pomiędzy kierunkiem działającego obciążenia a kierunkiem wzdłużnym włókien.



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek poddanych próbie statycznego rozciągania

Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 2. Przeciętna wilgotność próbek z drewna naturalnego była rzędu 12 – 15%. Próbki podzielono na dwie grupy. Pierwsza grupa niepoddana modyfikacji przeznaczona została bezpośrednio do badań, druga została poddana procesowi modyfikacji polegającej na nasyceniu metakrylanem metylu stabilizowanym eterem metylowym hydrohinonu (MM), a następnie polimeryzacji termicznej [6 – 9]. Próbki poddano rozciąganiu na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej MTS-810.

Wyniki badań dotyczących wytrzymałości drewna naturalnego K0.0 i modyfikowanego K0.35 – K0.56 określono dla każdego kąta α poprzez 6 – 10 powtórzeń.

Tabela 1. Wielkości statystyczne wytrzymałości drewna naturalnego K0.0 i modyfikowanego

Rodzaj materiału	**Wielkości statystyczne**	**α [°]**					
		0	**15**	**30**	**45**	**60**	**90**
Drewno naturalne K0.0	$\overline{R}_m$[MPa]	95.0	58.0	38.0	25.0	16.4	4.5
	S_n[MPa]	2.145	3.493	3.873	4.775	1.917	0.5
	S_{n-1}[MPa]	2.261	3.682	4.082	5.033	2.070	0.577
	V[%]	2.4	6.4	10.7	20.1	12.6	12.8
	K_1	1.399	1.431	1.807	1.466	1.878	0.111
Drewno modyfikowane K0.35	$\overline{R}_m$[MPa]	102.0	74.0	54.5	38.0	26.5	6.3
	S_n[MPa]	2.646	3.635	4.945	3.406	3.428	1.491
	S_{n-1}[MPa]	2.789	3.83	5.212	3.59	3.665	1.581
	V[%]	2.7	5.2	9.6	9.5	13.8	25.1
	K_1	1.864	2.268	2.064	2.055	1.604	0.787
Drewno modyfikowane K0.43	$\overline{R}_m$[MPa]	110.0	78.0	62.0	43.0	28.0	7.6
	S_n[MPa]	5.882	3.376	5.882	3.873	2.569	1.317
	S_{n-1}[MPa]	6.200	3.559	6.2	4.082	2.708	1.408
	V[%]	5.6	4.6	10.0	9.5	9.7	18.5
	K_1	2.040	1.777	2.04	1.807	1.557	1.822
Drewno modyfikowane K0.48	$\overline{R}_m$[MPa]	112.0	82.0	66.0	48.0	32.0	7.9
	S_n[MPa]	3.606	3.000	2.898	2.324	3.950	1.245
	S_{n-1}[MPa]	3.801	3.162	3.055	2.449	4.163	1.345
	V[%]	3.4	3.9	4.6	5.1	13.0	17.0
	K_1	1.664	1.333	2.07	1.721	1.772	1.687
Drewno modyfikowane K0.56	$\overline{R}_m$[MPa]	118.0	88.0	70.9	55.0	38.0	8.9
	S_n[MPa]	5.621	3.742	2.773	3.194	4.313	1.691
	S_{n-1}[MPa]	5.925	3.944	2.923	3.367	4.546	1.808
	V[%]	5.0	4.5	4.1	6.1	12.0	20.3
	K_1	1.245	1.871	1.479	1.565	1.855	1.833

gdzie: $\overline{R}_m$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie;
Sn – odchylenie standardowe;
V – współczynnik zmienności;
K_1 – współczynnik eliminacji błędów grubych.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wielkości statystyczne: średnią wytrzymałość na rozciąganie, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, współczynnik eliminacji błędów grubych.

Wielkości statystyczne określono dla drewna naturalnego K0.0 i modyfikowanego, a wyniki zestawiono w tabeli 1. Wartości krytyczne dla poziomu istotności 0.05 i liczby powtórzeń s wynoszą odpowiednio [16]:

$$k_1(0{,}05;4) = 1{,}689;\ k_1(0{,}05;7) = 2{,}093;\ k_1(0{,}05;8) = 2{,}172;$$
$$k_1(0{,}05;9) = 2{,}237;\ k_1(0{,}05;10) = 2{,}294. \tag{1}$$

OPIS WYTRZYMAŁOŚCI

Dla materiałów izotropowych hipotezy wytrzymałościowe mają postać typu

$$F(\sigma_{ij}) = C\,, \tag{2}$$

gdzie: z lewej strony pewna funkcja naprężeń, a z prawej wielkość otrzymywana przy jednoosiowym stanie naprężenia [4].

W przypadku materiałów anizotropowych winny być uwzględnione nie tylko składowe tensora naprężeń, ale także pewne wielkości tensorowe charakteryzujące własności wytrzymałościowe materiału. Ogólne kryterium wytrzymałości dla tych materiałów można zapisać w następującej postaci:

$$F(\pi_{ij}\sigma_{ij}, \pi_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} .....) = 0\,, \tag{3}$$

gdzie: $\pi_{ij}\sigma_{ij}, \pi_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl}$ ... – tensory wyrażające anizotropowe własności materiału;
$\sigma_{ij}, \sigma_{ij}\sigma_{kl}$ ... – wartości tensora naprężeń.

Spośród wielu znanych kryteriów opisujących wytrzymałość materiałów anizotropowych w niniejszym artykule przyjęto kryteria Misesa i Tsai-Wu.

Kryterium Misesa

W pracy Mises [11] podał kryterium w postaci:

$$P'_{ijkl}\sigma'_{ij}\sigma'_{kl} = 1, \tag{4}$$

gdzie: P'_{ijkl} – współrzędne tensora powierzchni wytrzymałości w układzie obróconym;

$\sigma'_{ij}, \sigma'_{kl}$ – współrzędne tensorów wytrzymałości w układzie obróconym.

Stosując wzór transformacyjny czwartego rzędu dla materiału ortotropowego

$$P'_{ijkl} = \alpha_{im}\alpha_{jn}\alpha_{ko}\alpha_{lp}P_{mnpo}, \quad i,j,k,l = 1, 2, 3, \tag{5}$$

gdzie: α_{im} – cosinus kąta między osią *i*-tą w nowym układzie i osią *m*-tą w starym układzie,

otrzymuje się w układzie $x_1\ x_3$

$$P'_{1111} = P_{1111}\cos^4\alpha + \left(2P_{1133} + 4P_{1313}\right)\cos^2\alpha\sin^2\alpha + P_{3333}\sin^4\alpha\,. \tag{6}$$

W pracy przyjęto, że $\sigma_{ij} = R_\alpha$.

Wykorzystując (6) i (4), po wstawieniu kątów $\alpha = 0, 15, 90°$ otrzymuje się

$$[P_{1111}\cos^4\alpha + \left(2P_{1133} + 4P_{1313}\right)\cos^2\alpha\sin^2\alpha + P_{3333}\sin^4\alpha]\sigma'^2_{11} = 1\,. \tag{7}$$

Dla $\alpha = 0^0$ na podstawie zależności (7), uwzględniając że $\sigma'_{11} = R_0$

$$P_{1111}R_0^2 = 1 \Rightarrow P_{1111} = \frac{1}{R_0^2}\,. \tag{8}$$

Dla $\alpha = 90^0$ na podstawie zależności (7), uwzględniając że $\sigma'_{11} = R_{90}$

$$P_{3333}R_{90}^2 = 1 \Rightarrow P_{3333} = \frac{1}{R_{90}^2}\,. \tag{9}$$

Dla $\alpha = 15^0$ na podstawie zależności (7), uwzględniając że $\sigma'_{11} = R_{15}$

$$\left(\sin 15^0 = \frac{\sqrt{6}-\sqrt{2}}{4}, \quad \cos 15^0 = \frac{\sqrt{6}+\sqrt{2}}{4}\right)$$

$$2P_{1133}+4P_{1313}=(\frac{1}{R_{15}^2}-P_{1111}\cos^4 15^0-P_{3333}\sin^4 15^0)/(\cos^2 15^0\sin^2 15^0). \tag{10}$$

Na podstawie zależności (4), uwzględniając że $\sigma_{11}^{'}=R_\alpha$

$$R_\alpha=\frac{1}{\sqrt{P_{1111}^{'}}}\cdot \tag{11}$$

Wstawiając do zależności (6) równania (8), (9), (10) i przyjmując $\sin 15^0=\frac{\sqrt{6}-\sqrt{2}}{4}$, $\cos 15^0=\frac{\sqrt{6}+\sqrt{2}}{4}$ oraz (11), otrzymano

$$R_\alpha=\frac{R_0}{\sqrt{\cos^4\alpha+b_1\sin^2 2\alpha+c_1\sin^4\alpha}}, \tag{12}$$

gdzie:

$$c_1=\left(\frac{R_0}{R_{90}}\right)^2,\ b_1=4\left(\frac{R_0}{R_{15}}\right)^2-\frac{7+4\sqrt{3}+c_1\left(7-4\sqrt{3}\right)}{4}. \tag{13}$$

Na podstawie danych doświadczalnych (z tabeli 1.) wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów R_0, R_{15}, i R_{90} w postaci:

$$R_0 = 93{,}2 + 0{,}3902x,\ r = 0{,}9434; \tag{14$_1$}$$

$$R_{15} = 57{,}2 + 0{,}5166x,\ r = 0{,}9924; \tag{14$_2$}$$

$$R_{90} = 4{,}27 + 0{,}076602x,\ r = 0{,}9735, \tag{14$_3$}$$

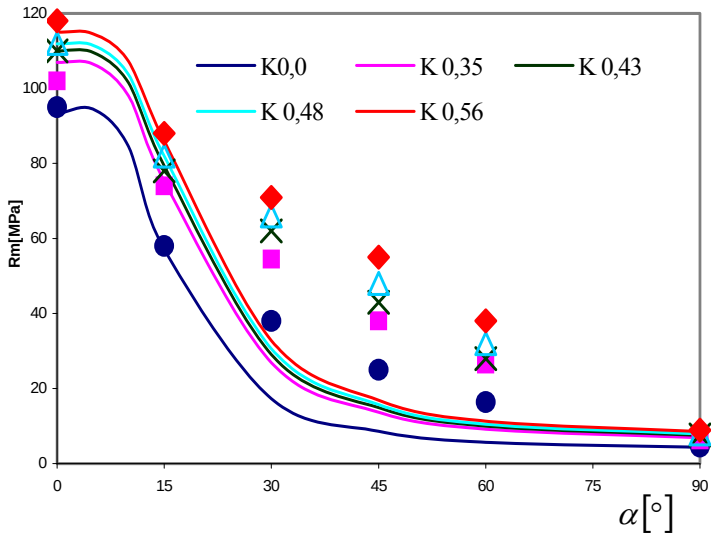
gdzie: x – zawartość polimeru w %;
r – współczynnik korelacji (wartość krytyczna tego współczynnika zgodna z [14] dla poziomu istotności 0.05 i przy 4 stopniach swobody wynosi 0.811).

W zależności (14) wartości R_0, R_{15}, R_{90} otrzymuje się w MPa.

Tabela 2. Wartości współczynników b_1 i c_1 do wzoru (12)

Rodzaj materiału	Stałe	
	b_1	c_1
drewno naturalne K0.0	–1.299	470
drewno modyfikowane K0.35	0.272	240
drewno modyfikowane K0.43	0.336	215
drewno modyfikowane K0.48	0.359	201
drewno modyfikowane K0.56	0.369	183

Na rysunku 3. zestawiono średnie wyniki badań doświadczalnych oraz krzywe teoretyczne według zależności (12).



Rys. 3. Zestawienie wytrzymałości na rozciąganie:
punkty – dane doświadczalne; linie ciągłe – kryterium Misesa

Kryterium Tsai-Wu

W pracy [13] Tsai-Wu podano kryterium dla materiałów anizotropowych w postaci

$$P'_{ij}\sigma'_{ij} + P'_{ijkl}\sigma'_{ij}\sigma'_{kl} + P'_{ijklmn}\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}\sigma'_{mn} + \ldots \leq 1, \tag{15}$$

gdzie : $\sigma'_{ij}, \sigma'_{kl}, \sigma'_{mn}$ – współrzędne tensorów wytrzymałości w układzie obróconym;

P'_{ij}; P'_{ijkl}; P'_{ijklmn} – współrzędne równania powierzchni.

Ze względu na brak możliwości doświadczalnego określenia wyrazów wyższych rzędów niż cztery, przyjmowane są dwa pierwsze wyrazy szeregu tensorowego. Dla płaskiego stanu naprężeń

$$a'_{11}R'_{11} + a'_{1111}R'^2_{11} \le 1, \tag{16}$$

gdzie:

$$a'_{11} = a_{11}\cos^2\alpha + a_{22}\sin^2\alpha = a\cos^2\alpha + b\sin^2\alpha; \tag{17}$$

$$\begin{aligned} a'_{1111} &= a_{1111}\cos^4\alpha + (\frac{1}{2}a_{1122} + a_{1212})\sin^2 2\alpha + a_{2222}\sin^4\alpha = \\ &= c\cos^4\alpha + d\sin^2 2\alpha + e\sin^4\alpha \end{aligned}. \tag{18}$$

Z (17) i (18) podstawiając

$$\text{dla } \alpha = 0°,\ R'_{11} = R_0,\ \text{dla } \alpha = 90°,\ R'_{11} = R_{90}, \tag{19}$$

otrzymujemy

$$aR_0 + cR_0^2 \le 1, \quad bR_{90} + eR_{90}^2 \le 1. \tag{20}$$

Z (17) mamy

$$a = \frac{1}{R_0} - cR_0, \quad b = \frac{1}{R_{90}} - eR_{90}. \tag{21}$$

Podstawiając (17), (18) i (21) do (16), otrzymujemy

$$\begin{aligned} &c(R_\alpha^2\cos^4\alpha - R_0R_\alpha\cos^2\alpha) + dR_\alpha^2\sin^2 2\alpha + e(R_\alpha^2\sin^4\alpha - R_{90}R_\alpha\sin^2\alpha) + \\ &+ \frac{R_\alpha}{R_0}\cos^2\alpha + \frac{R_\alpha}{R_{90}}\sin^2\alpha = 0 \end{aligned}. \tag{22}$$

Oznaczając:

$$R_\alpha^2\cos^4\alpha - R_0R_\alpha\cos^2\alpha = x;$$

$$R_\alpha^2\sin^2 2\alpha = y;$$

$$R_\alpha^2\sin^4\alpha - R_{90}R_\alpha\sin^2\alpha = z;$$

$$\frac{R_\alpha}{R_0}\cos^2\alpha + \frac{R_\alpha}{R_{90}}\sin^2\alpha - 1 = \varpi\,, \tag{23}$$

z (23) i (22) otrzymujemy

$$cx + dy + ez + \varpi = 0\,. \tag{24}$$

Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczamy stałe *c*, *d*, *e*, które zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości współczynników *a*, *b*, *c*, *d*, *e* określone na podstawie zależności (24)

Rodzaj materiału	$a \cdot 10^3$	b	$c \cdot 10^5$	$d \cdot 10^4$	$e \cdot 10^4$
K0.0	6.5392	0.2972	4.1969	–4.5346	–16.6602
K0.35	4.6952	0.2049	5.0086	–2.9840	–7.3302
K0.43	4.6242	0.1743	4.0607	–2.0727	–5.6186
K0.48	3.7155	0.1639	4.6545	–1. 9706	–4.7201
K0.56	5.1060	0.1437	2.8547	–1.8803	–3.5231

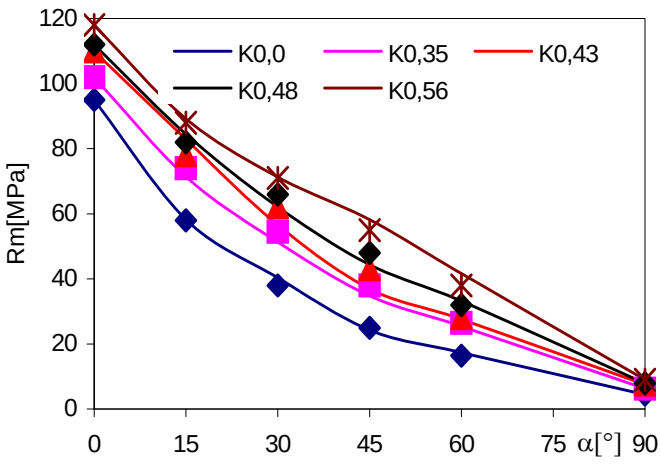
W tabeli 3. stałe *a* i *b* wyznaczono z zależności (21), natomiast stałe *c*, *d* i *e* uzależniono od zawartości polimeru w kompozycie w postaci:

$$\begin{aligned} c &= 4.1861\cdot 10^{-5} + 9.6432\cdot 10^{-5}x - 20.7957\cdot 10^{-5}x^2\,; \\ d &= -4.5351\cdot 10^{-4} + 5.0733\cdot 10^{-3}x\,; \\ e &= -16.3526\cdot 10^{-3} + 24.1269\cdot 10^{-3}x\,. \end{aligned} \tag{25}$$

Na podstawie zależności (25), (21), (18), (17) i (16) wyznaczono R_α^t, które zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości wytrzymałości R_α^t obliczone

α [°]	R_α^t **[MPa]**				
	K0.0	**K0.35**	**K0.43**	**K0.48**	**K0.56**
0	95	102	110	112	118
15	58.3	71.4	82.9	84.5	89.2
30	40.4	51.3	56.6	62.1	71.3
45	24.3	34.8	37.0	44.4	58.2
60	17.4	25.4	27.6	33.2	41.7
90	4.5	6.3	7.6	7.9	8.9



Rys. 4. Zestawienie wytrzymałości na rozciąganie:
punkty – dane doświadczalne; linie ciągłe – kryterium Tsai-Wu

Na rysunku 4. zestawiono średnie wyniki badań doświadczalnych oraz krzywe teoretyczne według zależności (16).

WERYFIKACJA STATYSTYCZNA OPISU

Oprócz weryfikacji graficznej poprawności opisu własności wytrzymałościowych kompozytu drewna przedstawionej na rysunkach 3. i 4. zastosowano weryfikację statystyczną w oparciu o test F-Snedocora. Zgodnie z nim opis jest poprawny wówczas, gdy wartość F obliczona ze wzoru (27) podanego poniżej jest mniejsza od wartości krytycznej tego rozkładu przy poziomie istotności $\alpha = 0.05$ lub $\alpha = 0.01$ i stopniach swobody f_1 (licznika) i f_2 (mianownika).

Weryfikację adekwatności różnych metod opisu przeprowadzono w oparciu o test F-Snedocora.

Wartość ilorazu warjancji F wyraża wzór

$$F = \frac{S^2(R)_a}{S^2(R)}, \tag{26}$$

gdzie: $S^2(R)_a$ – warjancja adekwatności;
$S^2(R)$ – warjancja niedokładności pomiaru;
R – wytrzymałość.

Rozpisując wzór (26), uzyskano

$$F = \frac{\dfrac{\sum\limits_{i-1}^{m}\left(\overline{R}_i^{\,e} - R_i^{\,t}\right)^2}{f_1}}{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{p_i}\left(R_{ij}^{\,e} - \overline{R}_i^{\,e}\right)^2}{f_2}}, \tag{27}$$

gdzie: $\overline{R}_i^{\,e}$ – średnia wytrzymałość empiryczna dla i-tego kąta;

$R_i^{\,t}$ – wytrzymałość obliczeniowa dla i-tego kąta zestawiona w tabeli 4.;

$R_{ij}^{\,e}$ – wytrzymałość eksperymentalna dla i-tego kąta i j-tego powtórzenia;

$m = 6$ – liczba kątów wycięcia próbek;

p_i – liczba powtórzeń;

$f_1 = \mathrm{m} - \mathrm{M}$ – stopnie swobody licznika wzoru (27);

$M = 3$ – liczba stałych występujących odpowiednio w równaniu (24);

$f_2 = \sum\limits_{i=1}^{m}\left(p_i - 1\right)$ – stopnie swobody mianownika wzoru (27).

Tabela 5. Zestawienie obliczeń statystycznych ze wzoru (27)

Rodzaj materiału	**Kryterium Tsai-Wu**		**Kryterium Misesa**	
	F z zależności (27)	$F_{0.05;\, f_1,\, f_2}$	F z zależności (27)	$F_{0.05;\, f_1,\, f_2}$
K0.0	0.192	2.815	21.37	2.815
K0.35	0.715	2.790	32.45	2.79
K0.43	1.535	2.785	36.77	2.785
K0.48	1.161	2.790	89.34	2.79
K0.56	1.863	2.785	65.63	2.785

Z tabeli 5. wynika, że dla kryterium Tsai-Wu $F < F_{0.05;\, f_1,\, f_2}$, co świadczy o poprawności opisu wytrzymałości kryterium Tsai-Wu. Natomiast dla kryterium Misesa ($F > F_{0.05;\, f_1,\, f_2}$) opis wytrzymałości tą metodą jest niepoprawny.

PODSUMOWANIE

Analiza uzyskanych wyników badań pozwala stwierdzić, że dla badanego drewna naturalnego i modyfikowanego bardzo dobrze własności wytrzymałościowe opisuje kryterium wytrzymałościowe Tsai-Wu w zależności od kąta α i zawartości polimeru. Ponadto tworzywo o większej zawartości PMM, jest bardziej jednorodne i wykazuje mniejsze własności anizotropowe.

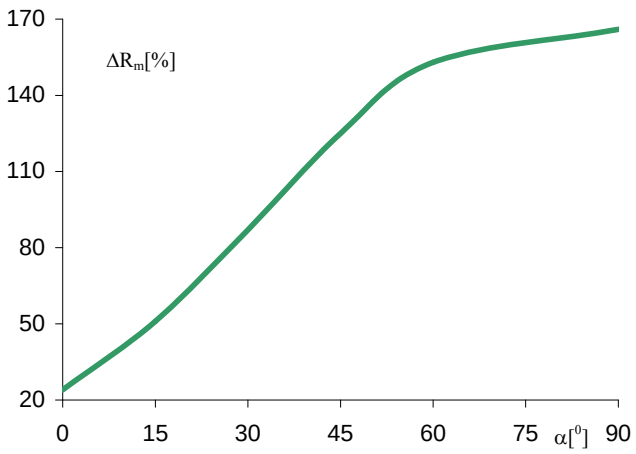
W tabeli 6. i na rysunku 5. zaprezentowano wyniki badań procentowego przyrostu granicy wytrzymałości na rozciąganie drewna modyfikowanego o największej zawartości polimeru (K 0.56) w stosunku do drewna naturalnego K0.0.

Tabela 6. Przyrost granicy wytrzymałości kompozytu D-PMM K 0.56 w zależności od kąta zawartego pomiędzy kierunkiem działającego obciążenia a włóknami

Zawartość polimeru 56%					
Kąt zawarty pomiędzy kierunkiem działającej siły a włóknami [^{0}]					
0	15	30	45	60	90
$\Delta R_m = R_m^5 - R_m^1$ [MPa]					
23	30	33	30	23	5
$\Delta R_m = \frac{R_m^5 - R_m^1}{R_m^1} \cdot 100[\%]$					
24	51	87	120	153	166

R_m^1 – wytrzymałość na rozciąganie drewna naturalnego K0.0;

R_m^5 – wytrzymałość na rozciąganie drewna modyfikowanego K0.56.



Rys. 5. Procentowy przyrost wytrzymałości na rozciąganie próbek drewna modyfikowanego K0.56 (w stosunku do drewna naturalnego K0.0) w zależności od kąta zawartego pomiędzy kierunkiem działającego obciążenia a kierunkiem włókien

Wytrzymałość na rozciąganie drewna modyfikowanego K0.56 jest:

- 24% większa dla kierunku wzdłużnego;
- 120% większa w przypadku, gdy kąt zawarty pomiędzy kierunkiem działającego obciążenia a kierunkiem włókien wynosi 45°;
- ponad 167% większa w przypadku, gdy obciążenie działa poprzecznie do kierunku włókien w stosunku do drewna naturalnego.

Oznacza to, że proces polimeryzacji znacznie zmniejsza anizotropię własności wytrzymałościowych drewna, cechy tak bardzo charakterystycznej dla drewna naturalnego.

Słowa kluczowe:
modyfikacja drewna, wytrzymałość na rozciąganie, kryterium Misesa, Tsai-Wu, test statystyczny F-Snedocora.

BIBLIOGRAFIA

[1] Boding J., Goodman I. R., *Prediction of elastic parameters for wood*, „Wood Sci.", 1973, Vol. 5, No 4.

[2] Boding J., Jayne B., A., *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold, New York 1982.

[3] Czech M., *Identyfikacja nieliniowych równań konstytutywnych pełzania anizotropowych ciał lepkosprężystych*, rozprawa naukowa, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.

[4] Gordon P. Krueger, Lynn B. Sandberg, *Ultimate-strength design of reinforced timber evaluation of design parameters*, „Wood Sci.", 1974, Vol. 6, No 4, pp. 316 – 329.

[5] Grzeczyński T., *Metoda określania stopnia wzmacniania drewna zmodyfikowanego polimerami*, I Sympozjum „Modyfikacja drewna", Poznań – Laski 1977.

[6] Kyzioł L., *Examination results of methylmethacrylate concentration in modified woods*, „Marine Technology Transactions", 2000, Vol. 11, pp. 181 – 194.

[7] Kyzioł L., Flis L., *Wpływ wody morskiej na własności lignomerów*, „Zeszyty Naukowe" AMW, 1995, Nr 3, s. 103 – 109.

[8] Kyzioł L., Kowalski S. J., *Mechanical properties of modified wood*, IUTAM Symposium on Theoretical and Numerical Methodes in Continuum Mechanics of porous Materials, Stuttgart, Germany, 5 – 10 September 1999, pp. 221 – 227.

[9] Kyzioł L., *Modified wood – a promising material for shipbuilding*, „Polish Maritime Research", 1999, p. 6 – 10.

[10] Mises R., *Mechanik der plastischen Formänderungen von kristallen. Zeitschrift für angew*, „Mat. und Mech.", 1928, B 8, H 4, s. 161 – 185.

[11] Nikoliv S. V., Videlov Ch., Abraszev G., *Modificirano na d'rvesinata*, Zemizdat, Sofia 1978.

[12] Nikolov S. V., Abrašev G., *Wpływ rodzaju drewna na jego modyfikację*, II Sympozjum „Modyfikacja drewna", Zielonka 1979, s. 179 – 186.

[13] Tsai S. W., Wu E. M., *A general theory of strength for anisotropic materials*, „J. Composite Materials", 1971, Vol. 5, No 7, pp. 125 – 143.

[14] Volk W., *Statystyka stosowana dla inżynierów*, WNT, Warszawa 1973.

[15] Wójtowicz A., Jabłoński M., *Niektóre własności fizykomechaniczne drewna zmodyfikowanego polimetakrylanem metylu jako funkcja jego zawartości w kompozycie*, „Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych", Modyfikacja Drewna III, 1981, Zeszyt 299, s. 179 – 185.

[16] Zieleński R., *Tablice statystyczne*, PWN, Warszawa 1972.

ABSTRACT

The article describes the strength properties of the wood at one-axis stretching, depending on α angle and polymer contents. To describe the strength the well-known strength criteria of the anisotropy materials Misesa end Tsai-Wu were used. The F-Snedocora statistical tests were used in order to verify the description of the criteria.

Recenzent prof. dr hab. inż. Romuald Rządkowski