

Lesław Kyzioł
Akademia Marynarki Wojennej

WYTRZYMAŁOŚĆ DREWNA MODYFIKOWANEGO W ZŁOŻONYCH STANACH NAPRĘŻEŃ

CZĘŚĆ I BADANIA DOŚWIADCZALNE

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wpływ modyfikacji drewna na zmianę jego właściwości wytrzymałościowych ze szczególnym uwzględnieniem wyężenia w stanie złożonym. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz obliczeń numerycznych zmodyfikowano geometrię próbki Iosipescu do badań drewna. Zaprezentowano stanowisko do badań próbek poddanych złożonemu stanowi obciążeń.

Słowa kluczowe:

materiał anizotropowy, wyężenie materiału, próbka Iosipescu, przyrząd pomiarowy, złożone obciążenia, rozkład naprężeń.

WSTĘP

W wielu opracowaniach [1–5, 7] podaje się, że właściwości drewna modyfikowanego, takie jak wytrzymałość na ściskanie wzdłuż i w poprzek włókien czy współczynnik sprężystości podłużnej, wznastają proporcjonalnie do ilości substancji modyfikującej polimeru wprowadzonej do drewna. Jednak wszystkich zmian właściwości mechanicznych drewna następujących pod wpływem modyfikacji nie można w pełni przewidywać bez przeprowadzenia konkretnych badań. Drewno jest bowiem materiałem wyraźnie anizotropowym, wykazującym bardzo zróżnicowane właściwości wytrzymałościowe w zależności od kierunku anatomicznego. Zgodnie z literaturą wyróżnia się trzy kierunki drewna: wzdłużny, styczny oraz promieniowy.

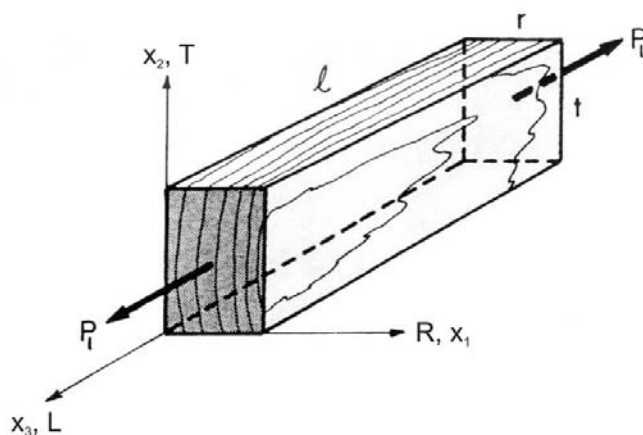
Przyjęto układ współrzędnych jak na rysunku 1. — oś L (x_3) w kierunku anatomicznym wzdłuż włókien, oś R (x_1) w kierunku promieniowym, a oś T (x_2) stycznie do powierzchni poszczególnych warstw włókien.

Drewno naturalne wykazuje stosunkowo niewielkie właściwości wytrzymałościowe. W celu ich zwiększenia poddaje się je modyfikacji. Modyfikacja drewna najogólniej polega na wprowadzeniu do struktury drewna polimeru syntetycznego i poddaniu całości procesowi polimeryzacji. Pod wpływem polimeryzacji następuje trwałe powiązanie składników drewna z polimerem syntetycznym w postaci „kopolimeru”. Powstaje nowy materiał o znacznie lepszych właściwościach od drewna naturalnego [7].

Drewno modyfikowane powierzchniowo wykazuje znaczny wzrost właściwości wytrzymałościowych w stosunku do drewna naturalnego. Szczególnie dotyczy to elementów poddanych zginaniu lub skręcaniu, w których maksymalne naprężenia występują w warstwach skrajnych.

Dotychczas, jak wynika z dostępnej literatury, nie prowadzono badań drewna modyfikowanego poddanego złożonemu stanowi obciążenia i nie dokonano opisu matematycznego dotyczącego tej problematyki.

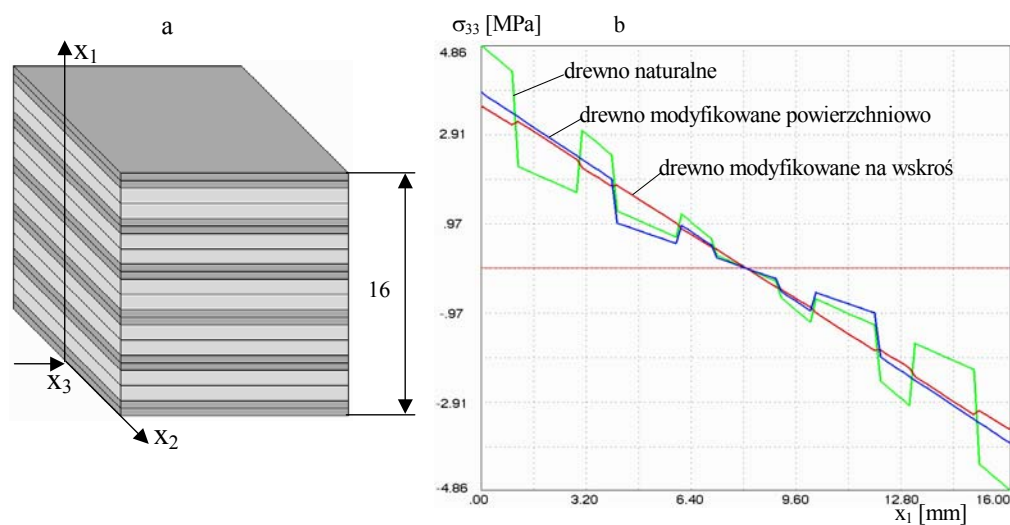
W obliczeniach rozkładu naprężenia płyty poddanej zginaniu na jej grubości uwzględniono różną konfigurację warstw drewna miękkiego i twardego (rys. 2a). Płyty rozważano jako elementy konstrukcyjne wykonane z drewna naturalnego, modyfikowanego powierzchniowo i modyfikowanego na wskroś [7].



Rys. 1. Orientacja kierunków anatomicznych drewna w układzie współrzędnych prostokątnych

W przypadku drewna naturalnego występują wyraźne zróżnicowania naprężeń w warstwach drewna miękkiego i twardego [7]. Warstwy drewna twardego podlegają znacznie większemu wyteżeniu aniżeli warstwy drewna miękkiego. W płycie z drewna modyfikowanego powierzchniowo na skutek modyfikacji warstw powierzchniowych drewna miękkiego wyteżenie warstw powierzchniowych miękkich i twardych jest zbliżone. Dla płyty z drewna poddanego modyfikacji na wskroś wyteżenie zmienia się jak w belce jednorodnej. Dlatego wystarczy modyfikować drewno tylko powierzchniowo. Modyfikacja powierzchniowa znacznie zwiększa wytrzymałość, a nieznacznie zmniejsza sztywność drewna. Zwiększenie zawartości polimeru zwiększa wytrzymałość oraz znacznie zmniejsza anizotropię wytrzymałości drewna.

Celem pracy jest określenie wyteżenia poddanej złożonemu stanowi obciążenia konstrukcji z drewna modyfikowanego powierzchniowo o różnej zawartości polimeru. W tym celu badania przeprowadzono na próbkach w przyrządzie zaprojektowanym i wykonanym w Akademii Marynarki Wojennej i Politechnice Białostockiej. W oparciu o uzyskane wyniki badań dokonano opisu anizotropii wytrzymałości (zależności wytrzymałości od kąta między włóknami a siłą rozciągającą). Wykorzystano wybrane kryteria wytrzymałościowe dla materiałów anizotropowych, które zostaną przedstawione w następnym opublikowanym w „Zeszytach Naukowych” AMW artykule.



Rys. 2.: a) występowanie warstw na grubości płyty;
b) rozkład naprężenia σ_{33} po grubości płyty — warstwę wierzchnią stanowi drewno późne

Aby dobrać właściwą hipotezę wytrzymałościową, należy ją zweryfikować z wynikami doświadczalnymi danego tworzywa. Celem ostatecznym było adaptowanie wybranych hipotez wytrzymałościowych opisujących właściwości wytrzymałościowe drewna do wyników, jakie uzyskano z badań. Na podstawie obserwacji poczynionych w trakcie badań oraz przeprowadzonych obliczeń numerycznych zmodyfikowano geometrię próbki Iosipescu do badań drewna [7].

PRZEBIEG BADAŃ

Badania przeprowadzono na powierzchniowo modyfikowanym polimeta-krylanem metylu drewnie sosnowym, którego sposób modyfikacji szczegółowo opisano w pracy [7]. Z materiału o zmiennej zawartości polimeru wykonano próbki, na których przeprowadzono badania mające na celu określenie wytrzymałości drewna na rozciąganie, ściskanie, rozciąganie-ściananie oraz ściskanie-ściananie. Kształt i wymiary próbek do badań wykonano zgodnie z normami [10–12].

Badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przeprowadzono na typowych maszynach wytrzymałościowych [7]. Problemem badawczym materiałów anizotropowych jest zawsze określenie wytrzymałości na ściananie oraz w złożonym stanie naprężeń.

Badania wytrzymałościowe kompozytów przeprowadza się na próbkach rurkowych lub płaskich. Wykonanie próbek rurkowych z drewna do badań złożonego stanu obciążenia jest kłopotliwe ze względu na anatomiczną budowę drewna (słoje roczne) i dlatego w tej pracy zdecydowano się na przeprowadzenie badań na próbkach płaskich.

Przy badaniu próbki płaskiej należy mieć na uwadze, że uzyskanie kryterium zniszczenia powoduje konieczność wytworzenia ścinania. Ważną cechą próby jest jednorodność naprężenia w badanym obszarze próbki.



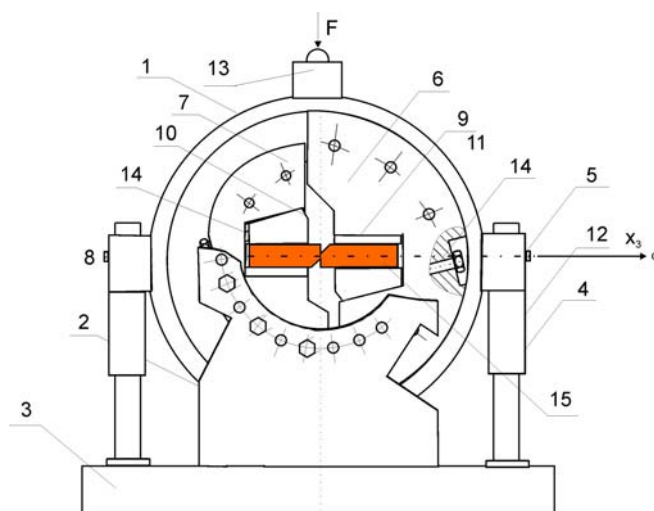
Rys. 3.: a) zmodyfikowana próbka Iosipescu; b) próbka o warstwach wierzchnich drewna późnego; c) próbka o warstwach wierzchnich drewna wczesnego ($\beta = 45^\circ$, $g = 5$ mm — grubość próbki, $b = 20$ mm — szerokość próbki, $p = 5$ mm — długość przekroju pomiarowego, $L = 80$ mm — długość próbki)

Wstępne badania drewna na typowej próbce Iosipescu, w której występuje naprzemienny układ warstw nie zawsze równoległych, niekiedy skrętnych, wykazały, że nie uzyskuje się poprawnych wyników. W trakcie ścinania próbki w dnie karbu występują nie tylko naprężenia styczne. Przy poprzecznym obciążeniu próbek występuje zginanie i powstają naprężenia normalne od momentu zginającego. Włókna drewna odkształcają się (wygięcie i wydłużenie). Trudne jest uchwycenie początku niszczenia próbki [7].

Biorąc pod uwagę doświadczenia Iosipescu [6, 9], przygotowano próbkę, którą badano wielokrotnie, przyjmując ostatecznie jej kształt i wymiary jak na rysunku 3. Próbka ta zasadniczo różni się od typowej próbki Iosipescu **geometrią karbu**. Przyjęcie takiej geometrii próbki jest wynikiem wielu **badania, obliczeń numerycznych i obserwacji** poczynionych w trakcie prób. Głębokość karbu uwzględniono w stosunku do grubości warstw, tak aby początek karbu występował na jej krawędzi [7].

Przeprowadzono badania próbek o różnej konfiguracji warstw drewna miękkiego i twardego. Przy wykonywaniu próbek zwracano uwagę, aby warstwy drewna były ułożone równoległe i miały niezmienną grubość na długości.

Istnieją produkowane seryjnie maszyny wytrzymałościowe do badań przy złożonych obciążeniach, wyposażone w specjalne uchwyty próbek. Jednakże ze względu na ich koszty oraz specyfikę badań urządzenia takie są często opracowywane i wykonywane w laboratoriach, w których prowadzi się tego typu badania.



Rys. 4. Przyrząd do wytwarzania płaskiego stanu naprężenia:

- 1 — obudowa, 2 — wspornik, 3 — podstawa, 4 — prowadnica, 5 — tuleja prowadząca,
 6 — uchwyt prawy, 7 — uchwyt lewy, 8 — wkładka do szczęki uchwytu lewego, 9 — wkładka
 do szczęki uchwytu prawego, 10 — blok ustalający lewy, 11 — blok ustalający prawy,
 12 — tuleja prowadnicy, 13 — mocowanie kulki i kulka $\phi 12$, 14 — śruba M6, 15 — badana próbka;
 F — siła nacisku wywierana przez maszynę wytrzymałościową, o — oś próbki

Zaprojektowane i wykonane urządzenie przedstawione na rysunku 4. pozwoliło do zadawania płaskiego stanu naprężenia [7].

Bloki ruchome i nieruchome są wstępnie zaciskane tak, aby składowa siły F równa Fx_3 była mniejsza od siły tarcia pomiędzy blokami i próbką. Jednakże zaciskanie to wprowadza wstępny stan naprężenia. Z tego względu wartość zacisku ustalono doświadczalnie w taki sposób, aby był wystarczający, ale nie wpływał istotnie na wytrzymałość próbki. W następnym etapie bloki ruchome były przemieszczane w kierunku nachylonym pod kątem δ do osi próbki. W trakcie badań mierzono wartość siły F w zależności od przemieszczenia próbki. W przypadku gdy kąt $\delta = 0$, stan naprężenia jest najbardziej zbliżony do czystego ścinania. Przyrząd umożliwia zmianę kąta δ w zakresie $-45 \text{ — } +45^\circ$. Rozciąganie i ściskanie próbki w kierunku osi x_3 prowadzono przy zamocowaniu próbki bezpośrednio w szczękach maszyny wytrzymałościowej.

W porównaniu z tradycyjnym przyrządem do badania próbek położenie osi próbki względem kierunku działania obciążenia F może być zmienne. Dzięki temu, w zależności od kąta ustawienia próbki w stosunku do kierunku obciążenia, realizowane jest w jej centralnej części oprócz ścinania także rozciąganie lub ściskanie.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań czystego rozciągania, ściskania i ścinania przedstawiono w pracy [7], natomiast wartości uśrednione podano w tabelach 1–3 oraz przedstawiono na rysunku 5. (a, b, c). Za pomocą funkcji wykładniczych opisano wyniki badań:

a) rozciągania

$$R_m = a e^{bx}; \ln R_m = \ln a + bx; \text{ podstawiając } \ln R_m = y; \ln a = A; y = A + bx$$

$$A = 4.538$$

$$a = 93.5$$

$$b = 0.372$$

$$r = 0.9513$$

r — współczynnik korelacji

x — zawartość polimetakrylanu metylu w kompozycie

$y = \ln R_m$ — wytrzymałość doraźna na rozciąganie kompozytu

Tabela 1. Zestawienie danych statystycznych rozciągania drewna naturalnego i kompozytu D-PMM

Zawartość polimeru W[kg/kg]	$R_m = R_{11}$ [MPa]	y	$y^{teor.}$	R_m^{teor} [MPa]
0	95	4.554	4.538	93.5
0.35	102	4.625	4.668	106.5
0.43	110	4.700	4.698	109.7
0.48	112	4.718	4.717	111.8
0.56	118	4.771	4.746	115.1

gdzie: cyfry w kolumnie 1. oznaczają zawartość w kg polimetakrylanu metylu na kg drewna w stanie powietrzno-suchym (ok. 12% wilgotności D-PMM — kompozyt drewno-polimetakrylan metylu)

$$R_m^{teor} = 93.5 \cdot e^{0.372 \cdot W} = R_{11}; \quad (1a)$$

b) ściskania

$$R_c = a e^{bx}$$

$$A = 3.975$$

$$a = 53.25$$

$$b = 1.1001$$

$$r = 0.9735$$

Tabela 2. Zestawienie danych statystycznych ściskania drewna naturalnego i kompozytu D-PMM

Zawartość polimeru W[kg/kg]	R_c [MPa]	y	$y^{teor.}$	R_c^{teor} [MPa]
0	55	4.007	3.975	53.3
0.35	70	4.248	4.325	75.6
0.43	80	4.382	4.405	81.9
0.48	88	4.475	4.455	86.1
0.56	98	4.585	4.536	93.3

$$R_c^t = 53.25 e^{1.001 \cdot W} = R_{11}; \quad (1b)$$

c) ścinania

$$R_t = a e^{bx}$$

$$A = 3.064$$

$$a = 21.41$$

$$b = 0.524$$

$$r = 0.9332$$

Tabela 3. Zestawienie danych statystycznych ścinania drewna naturalnego i kompozytu D-PMM

Zawartość polimeru W[kg/kg]	R_t [MPa]	y	$y^{teor.}$	R_t^{teor} [MPa]
0	22.1	3.091	3.064	21.4
0.35	25.7	3.178	3.247	25.4
0.43	26.5	3.277	3.289	26.8
0.48	27.8	3.325	3.316	27.5
0.56	30.2	3.401	3.357	28.7

$$R_t^t = 21.41e^{0.524 \cdot W} = R_{12} \cdot \quad 1c)$$

R_m , R_c , R_t — wartości średnie na podstawie pomiarów;

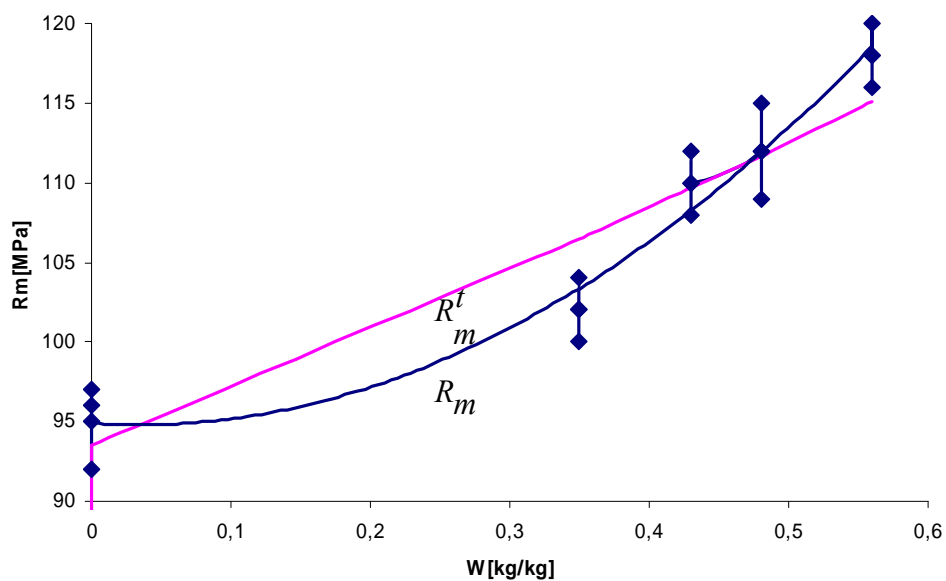
R_m^{teor} , R_c^{teor} , R_t^{teor} — wartości średnie uzyskane odpowiednio na podstawie zależności (1a), (1b) i (1c).

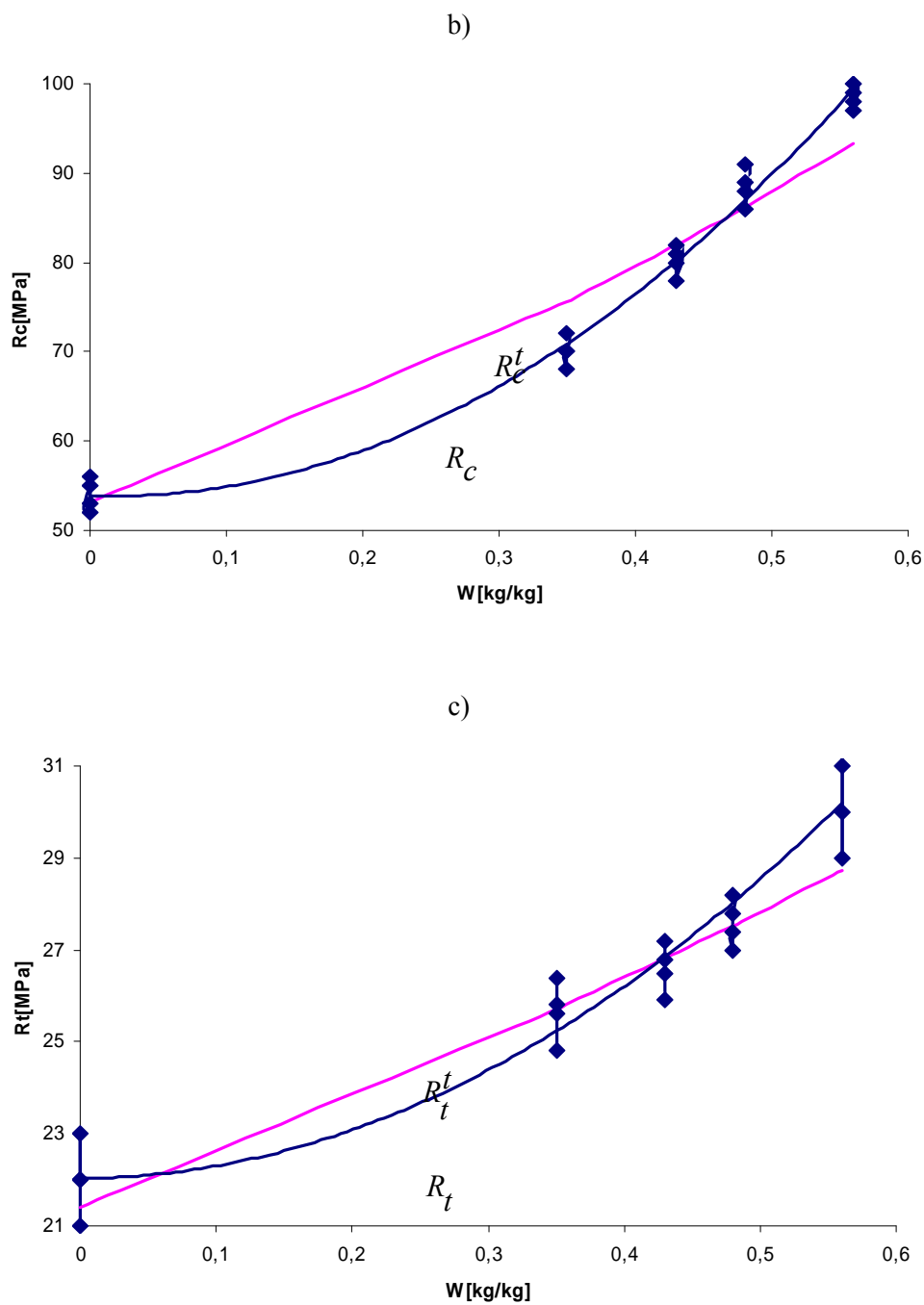
$$y = \ln R_m; \quad y^{teor} = \ln R_m^{teor} \quad (\text{tab. 1.})$$

$$y = \ln R_c; \quad y^{teor} = \ln R_c^{teor} \quad (\text{tab. 2.})$$

$$y = \ln R_t; \quad y^{teor} = \ln R_t^{teor} \quad (\text{tab. 3.}).$$

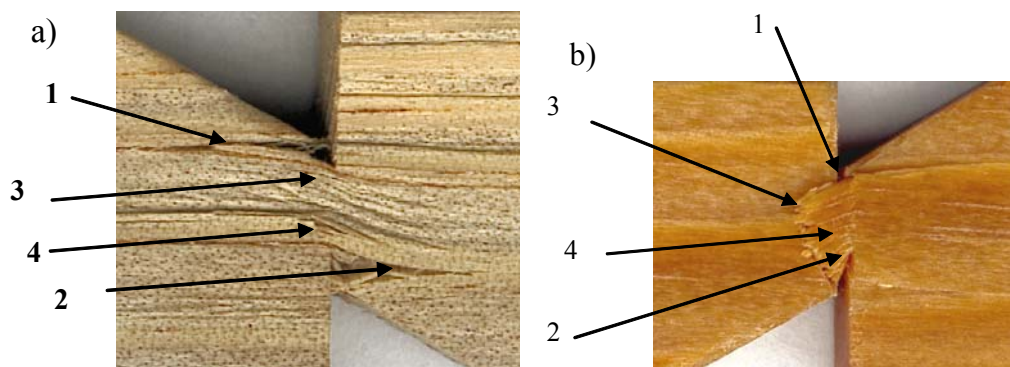
a)



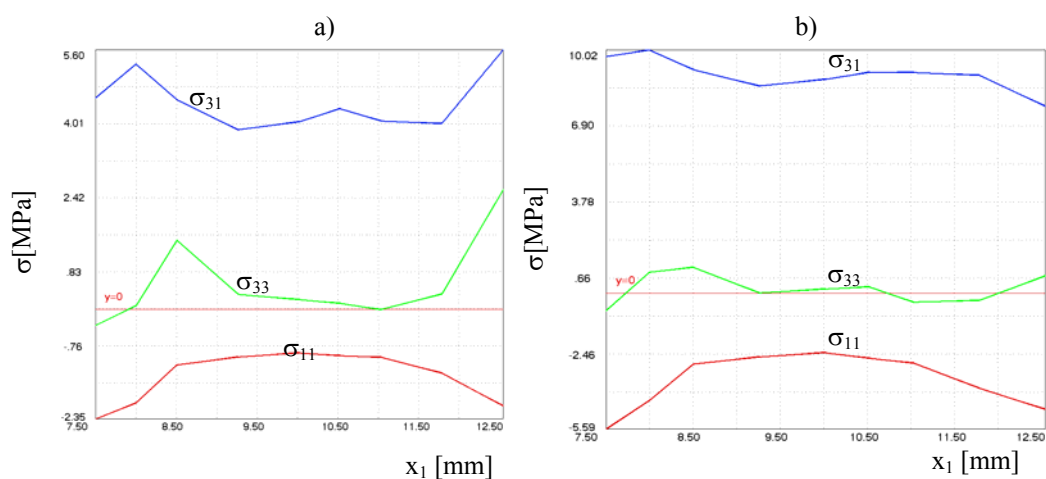


Rys. 5. Zależność granicy wytrzymałości na:
a) rozciąganie; b) ściskanie; c) ścinanie kompozytu w zależności od zawartości polimeru

Na rysunku 6. przedstawiono obrazy pęknięć drewna naturalnego i modyfikowanego. Poddane obciążeniu warstwy drewna naturalnego przypominały „nitki” znacznie odkształcone i uchwycenie momentu, kiedy ostatnia warstwa ulega zniszczeniu, jest kłopotliwe (rys. 6a). Próbki drewna modyfikowanego wykazały większą odporność na pęknięcie. Ze wzrostem zawartości polimeru w kompozycie materiał stał się bardziej odporny na zniszczenie (rys. 6b).



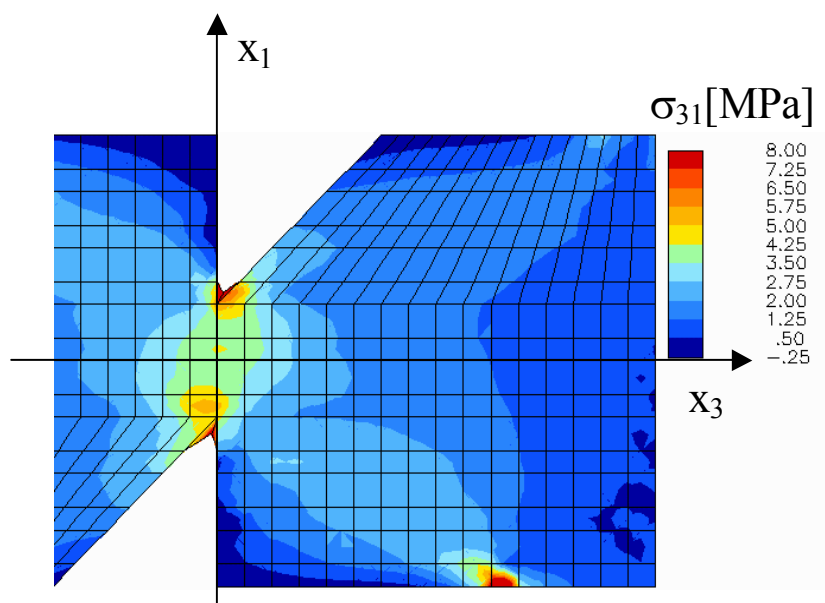
Rys. 6. Obrazy pęknięć próbek: a) drewna naturalnego; b) drewna modyfikowanego; 1, 2, 3, 4 — kolejne etapy pęknięcia próbki drewna [7]



Rys. 7. Rozkład naprężeń w przekroju pomiarowym próbek z drewna: a) naturalnego; b) modyfikowanego poddanych złożonemu stanowi naprężeń (układ współrzędnych na rys. 2.)

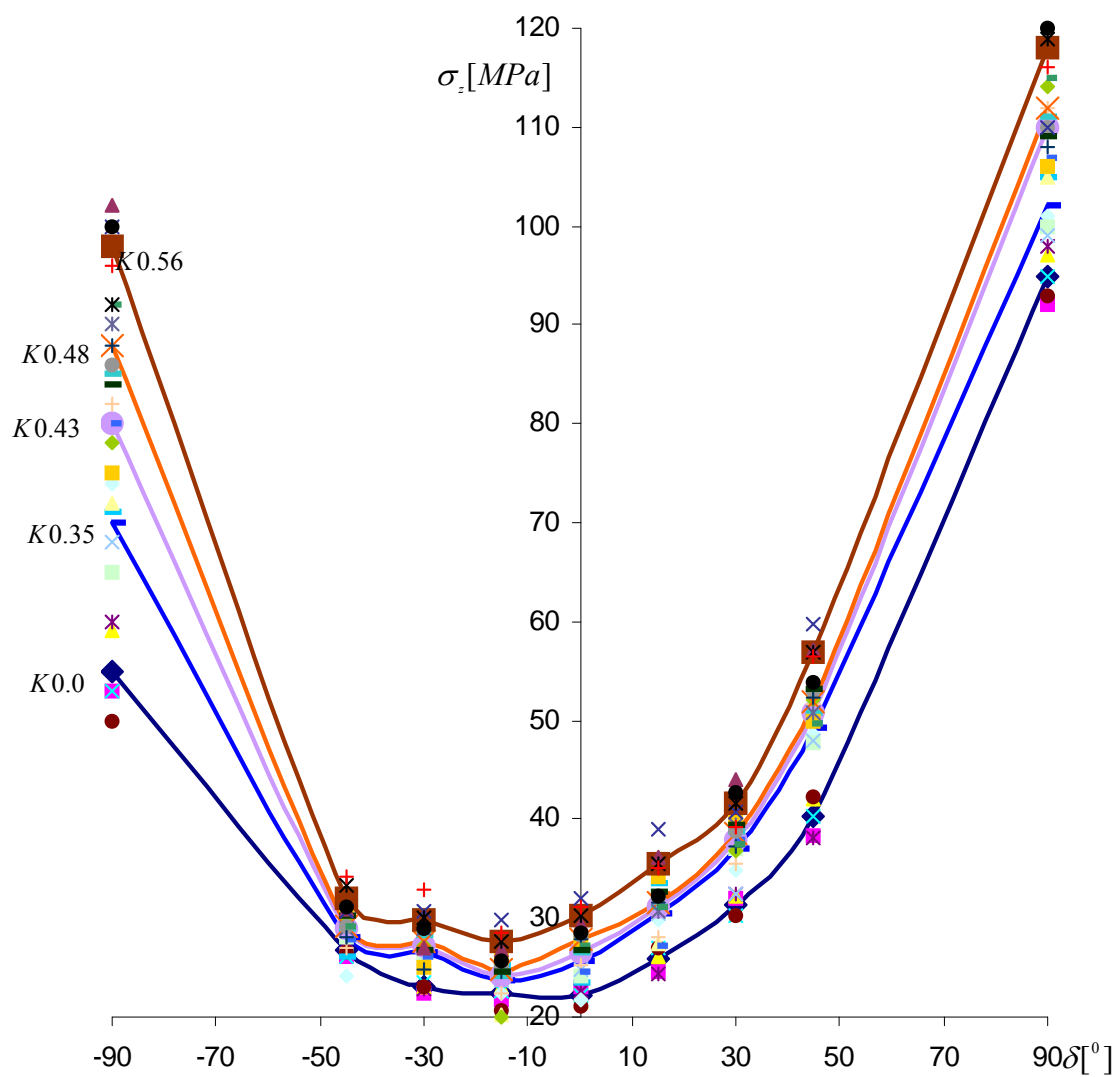
Na rysunku 7. przedstawiono rozkład naprężeń w przekroju pomiarowym próbki drewna naturalnego i modyfikowanego. Największe wartości uzyskują naprężenia ścinające σ_{31} przy niemalże zerowych naprężeniach σ_{33} i $\sigma_{11} = 0.25\sigma_{31}$. Rozkład naprężeń wzdłuż analizowanego przekroju pomiarowego próbki dla drewna naturalnego i modyfikowanego jest odmienny. Dla drewna naturalnego wykres „piłowy” wskazuje na wzrost wartości naprężeń w drewnie twardym w stosunku do drewna miękkiego. W drewnie modyfikowanym rozkład naprężeń jest zbliżony do równomiernego, ponieważ właściwości sprężyste warstw są zbliżone [7]. W wyniku modyfikacji warstw miękkich nastąpiło „ujednorodnienie” materiału, dlatego krzywa wskazuje bardziej równomierny rozkład naprężeń.

Obliczone za pomocą MES naprężenie σ_{31} zobrazowano w postaci planu warstwicowego na rysunku 8. przykładowo dla drewna modyfikowanego. Rozkład naprężenia stycznego w przekroju pomiarowym próbki z drewna modyfikowanego wykazuje na niemalże jednakowe wyężenie warstw drewna twardego oraz miękkiego. Jest to spowodowane „ujednorodnieniem” materiału w kierunku warstw drewna twardego [7].



Rys. 8. Rozkład naprężenia σ_{31} w wybranym obszarze próbki dla drewna modyfikowanego

Na rysunku 9. przedstawiono „chmurę wyników badań” wartości naprężeń drewna naturalnego i zmodyfikowanego uzyskanych na próbkach Iosipescu w próbie czystego ścinania ($\delta = 0^\circ$), ścinania ze ściskaniem ($-90^\circ < \delta < 0^\circ$) i ścinania z rozciąganiem ($0^\circ < \delta < 90^\circ$) w zależności od zawartości polimeru oraz kąta δ opisującego kierunek włókien drewna do kierunku obciążenia.



Rys. 9. Wartości naprężeń zastępczych w próbkach kompozytu w zależności od zawartości polimeru i kąta δ (punktami oznaczono wyniki z pomiarów, linią wartości uśrednione)

Można zaobserwować znaczny wzrost wartości naprężeń ze wzrostem zawartości polimeru, szczególnie dla czystego rozciągania lub ściskania. Wzrost właściwości wytrzymałościowych drewna modyfikowanego w stosunku do drewna naturalnego ze wzrostem zawartości polimeru jest spowodowany tym, że pory drewna (jako materiału porowatego) zostają wypełnione polimerem. Pod wpływem częściowej polimeryzacji polimeru kompozytu syntetycznego ze składnikami struktury drewna jako kompozytu naturalnego powstaje nowa struktura kompozytu o znacznie większych właściwościach wytrzymałościowych od składowych tworzących powstały kompozyt.

PODSUMOWANIE

Drewno jest materiałem niejednorodnym składającym się z naprzemiennych warstw drewna miękkiego (słabego) i twardego (mocnego). W próbce do badań wytrzymałości na ścinanie lub złożonego stanu obciążenia przeciętnie znajdowało się dziewięć warstw drewna miękkiego i osiem warstw drewna twardego (lub odwrotnie). Stosunek grubości warstw drewna twardego do miękkiego wynosił około 0,5. Głębokość karbu w badanej próbce rozważano w stosunku do grubości warstw tak, aby początek karbu nie występował w połowie grubości warstwy, lecz na jej krawędzi. Przyjęto, że warstwy są ułożone równolegle i mają niezmienną grubość na długości. W przekroju pomiarowym warstwa wierzchnia może być warstwą drewna miękkiego lub twardego.

Wyznaczono wytrzymałość na ścinanie oraz rozkład naprężeń w złożonych stanach obciążeń (ścinięcie/rozciąganie oraz ścinanie/ściskanie) w przekroju pomiarowym próbki drewna naturalnego i modyfikowanego. Wypełnienie struktury drewna polimerem powoduje ujednorodnienie materiału w kierunku wzrostu wytrzymałości warstw drewna twardego. Jednakże materiał ten jest dalej anizotropowy; stąd wynikają różnice jego wytrzymałości przy przeciwnych kątach obciążenia (ścinięcie/rozciąganie oraz ścinanie/ściskanie).

Badania wytrzymałościowe na próbkach drewna naturalnego i modyfikowanego wykazało znaczny wzrost wytrzymałości drewna modyfikowanego ze wzrostem zawartości w nim polimeru.

Zastosowanie metod numerycznych umożliwia określenie rozkładu naprężeń w analizowanym przekroju pomiarowym próbek poddanych rozciąganiu lub ściskaniu. Uzyskane rezultaty pozwalają na analizowanie rozkładu naprężeń w próbce płaskiej z materiału ortotropowego poddanej jednoosiowemu rozciąganiu (ściskaniu).

Przeprowadzona analiza wykazała, że rozciąganie (ściskanie) próbki w kierunku równoległym włókien x_3 powoduje rozciąganie (ściskanie) włókien w kierunku poprzecznym x_1 .

Wykonany przyrząd pozwolił na przeprowadzenie badań próbek z drewna w złożonych stanach obciążeń. Dokonana analiza rozkładu naprężeń w przekroju pomiarowym próbki wykazała, że dla każdego przypadku obciążenia próbki występuje w niej niejednorodny stan naprężenia. Wartości, które uzyskano w złożonych stanach obciążeń, są przybliżone. Do modelu obliczeniowego przyjęto wartości średnie z pomiarów.

Można zaobserwować, jakie korzyści spowodowała modyfikacja drewna. Wytężenie materiału modyfikowanego przy ściskaniu wzdłuż włókien może być prawie dwu-, a w poprzek włókien ponad czterokrotnie większe dla analogicznych kierunków w stosunku do drewna naturalnego.

Stąd nasuwa się praktyczny wniosek dla konstruktorów, że głównie drewno modyfikowane powinno być stosowane na konstrukcje poddawane ściskaniu. Również przy rozciąganiu widoczny jest znaczny wzrost wytrzymałości drewna modyfikowanego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adams D. F., Lewis E. Q., *Experimental assesment of four composite material shear test methods*, „J. Test. Evaluat.”, 1995, Vol. 25, No 2, pp. 242–254.
- [2] Adams D. F., Walrath D. F., *Current status of the Iosipescu shear test*, „J. Comp. Mat.”, 1987, Vol. 25, No 1, pp. 494–506.
- [3] Arcan M., Hashin Z., Voloshin A., *A method to produce uniform plane-stress states with applications fiber-reinforced materials*, „Exp. Mech.”, 1984, Vol. 18, pp. 141–145.
- [4] Aškenazi E. K., Ganov Z. V., *Anizotropia konstrukcyjnych materialov*, Mašinstrojenje, Leningrad 1985.
- [5] Boding J., Goodman I. R., *Prediction of elastic parameters for wood*, „Wood Sci.”, 1973, Vol. 5, No 4, pp. 378–385.
- [6] Iosipescu N., *New accurate procedure for single shear testing of metals*, „J. Mater.”, 1967, Vol. 2, No 3, pp. 537–566.
- [7] Kyzioł L., *Analiza właściwości drewna konstrukcyjnego nasyconego powierzchniowo polimerem MM*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2004, nr 156A.

- [8] Pierron F., Vautrin A., *Measurement of the in-plane shear strengths of unidirectional composites with the Iosipescu test*, „Composites Science and Technology”, 1997, Vol. 57, pp. 1653–1660.
- [9] Walrath D. E., Adams D. F., *The Iosipescu shear test as applied to composite materials*, „Ex. Mech.”, 1983, Vol. 3, pp. 105–110.
- [10] PN-79/D-04105. Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie wzdłuż włókien.
- [11] PN-81/D-04107. Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien.
- [12] PN-81/D-04108. Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien.

ABSTRACT

The paper presents the effect of wood modification on changes in its strength. The research done and numerical calculations made were used to modify geometry of Iosipec sample to scientific investigations of wood. It shows the test bed for investigating samples subjected to a complex load condition.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stefan J. Kowalski