

st. kpt. dr inż. Paweł Ogrodnik\*  
 mł. bryg. dr inż. Renata Kamocka-Bronisz\*  
 bryg. dr inż. Waldemar Jaskółowski\*

# Badanie wpływu impregnacji ogniochronnej na wytrzymałość drewna w podwyższonej temperaturze

## *Study of the fire-retardant impregnation effect on the wood strength at the increased temperature*

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych wpływu podwyższonej temperatury na wytrzymałość przy rozciąganiu drewna sosnowego oraz drewna egzotycznego merbau (*Intsia Bijuga*), stosowanego w budownictwie i konstrukcjach inżynierskich, impregnowanego nowoczesnymi środkami ogniochronnymi zawierającymi nanocząstki  $\text{SiO}_2$  o rozmiarach 10 – 20 nm. Impregnację przeprowadzono metodą próżniową przez 15 min, stosując podciśnienie ok. 0,7 at. Badania wytrzymałościowe zostały wykonane w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP.

**Słowa kluczowe:** drewno, impregnacja ogniochronna, wytrzymałość na rozciąganie.

**Abstract.** The article presents results of the experimental studies of the effects of increased temperature on tensile strength of pine wood and exotic wood merbau (*Intsia Bijuga*) used in building and engineering constructions impregnated with modern fire-retardant agents containing  $\text{SiO}_2$  nanoparticles of size 10 – 20 nm. The impregnation was carried out by vacuum method for 15 minutes using a vacuum row (0,7 atm). The strength tests were carried out at the Department of Applied Mechanics of The Main School of Fire Service.

**Keywords:** wood, fire-retardant impregnation, tensile strength.

Czynnikami decydującymi o rosnącej popularności drewna egzotycznego jest nieprzeciętna barwa, atrakcyjny rysunek i struktura, przy jednocześnie bardzo dobrych właściwościach termicznych [1]. Nie bez znaczenia jest także swobodna dostępność surowca, aktualne koncepcje architektoniczne oraz wzrost świadomości ekologicznej inwestorów. Mnogość gatunków drewna egzotycznego oraz specyficzne właściwości techniczne, warunkowane m.in. wzrostem w warunkach klimatu tropikalnego, sprawiają, że jest ono słabo poznane [1, 2]. Dodatkowo problemem okazuje się nazewnictwo. Powszechną praktyką w obrocie drewnem egzotycznym jest sprzedaż jednego gatunku pod różnymi nazwami. Aby uniknąć pomyłek, istotnym czynnikiem jest podanie kodu wg PN-EN 13556 [8] oraz nazwy botanicznej.

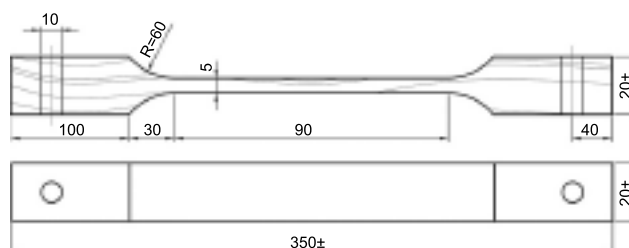
Drewno jest materiałem palnym podlegającym termicznej degradacji. W warunkach pożaru konstrukcja drewniana jest jednocześnie poddana oddziaływaniu wymuszeń w formie sił oraz oddziaływaniom termicznym. Wysoka temperatura występująca w procesie pożaru powoduje dekohezję struktury. Zauważalna redukcja wytrzymałości drewna następuje już w temperaturze wyższej od 65 °C [3, 4]. Na poziomie mikrostrukturalnym drewno jest niehomogenicznym kompozytem komórkowym celulozy, hemicelulozy, ligniny i innych mniej istotnych składników. Degradacja wysuszonej celulozy następuje w temperaturze ok. 300 °C, degradacja hemicelulozy już w temperaturze 150 – 200 °C, a dekompozycja ligniny, decydującej o spoiwości struktury drewna, pomiędzy 220 a 250 °C [5, 6], natomiast dehydratacja ligniny w temperaturze 200 °C [7]. Celem badań prze-

prowadzonych w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP było określenie wpływu nowoczesnego środka ogniochronnego, zawierającego nanocząstki  $\text{SiO}_2$ , na wytrzymałość dwóch gatunków drewna – sosny i merbau, poddanych wstępnej obróbce termicznej w podwyższonej temperaturze.

### Metodyka wykonania badań

**Próbki do przeprowadzenia impregnacji i badań wytrzymałościowych** były wolne od wad. Wymiary i kształt próbek wykorzystywanych w badaniach wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 1. Przed wykonaniem obróbki termicznej część próbek poddano impregnacji próżniowej w suszarce SPU-200. Urządzenie to ma zakres temperatury pracy od temperatury otoczenia do 200 °C oraz dopuszczalną próżnię wynoszącą 0,099 MPa. Próbki zaimpregnowano wodnym roztworem zawierającym nanocząstki krzemionki o rozmiarach 10 – 20 nm. Właściwości impregnatu przedstawiono w tabeli 1.

Do wykonania roztworu wykorzystano mieszalnik elektromagnetyczny. Stężenie roztworu wynosiło 400 ppm. Następnie do głębokiego pojemnika przelano roztwór w ilości zapewniają-



Rys. 1. Próbki do badań wytrzymałościowych

[Źródło: opracowanie własne]

\* Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Tabela 1. Szczegółowe właściwości chemiczne i fizyczne impregnatu SiO<sub>2</sub>

Właściwości impregnatu	Opis/wartość
Wygląd	Biały proszek
Zapach	Brak
Wielkość cząstek	10 – 20 nm
Początkowa temperatura topnienia	1600 °C
Początkowa temperatura wrzenia	2300 °C
Gęstość objętościowa	0,011 g/ml

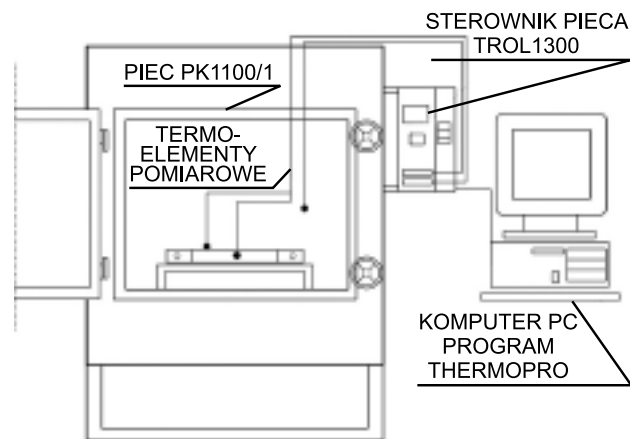
[Źródło: opracowanie własne]

próbki osuszono i przechowywano w temperaturze otoczenia.

**Obróbka termiczna próbek.** W celu określenia minimalnego czasu ekspozycji potrzebnej do równomiernego ogrzania próbki w całej objętości przeprowadzone zostały badania wstępne. Po umieszczeniu próbek w piecu zamontowano na ich powierzchni oraz wewnątrz, w specjalnie przygotowanym kanaliku, termopary pomiarowe. Jako minimalny czas nagrzewania próbki określono czas, po którym termopara umieszczona wewnątrz próbki uzyskuje wartość temperatury przyjętej w planie badań. Ustalono, że temperaturą odniesienia będzie temperatura otoczenia wynosząca 20 °C. Temperaturę graniczną określono na poziomie 250 °C (jest ona bliska temperaturze zapłonu drewna).

Podstawową część stanowiska do wygrzewania próbek stanowi średniotemperaturowy piec komorowy typu PK 1100/5. Szkielec pieca wykonany jest z rur kwadratowych i nierdzewnej stalowej blachy. Warstwę izolacyjną stanowią kształtki i mata z włókien ceramicznych. Elementy grzejne pieca wykonane zostały z drutu oporowego KANTHAL A1 w kształcie spiral, a układ sterowniczy znajdował się w dwóch szafach połączonych z ramą nośną pieca. Realizują one regulację temperatury oraz transmisję sygnałów termoelektrycznych z czujników pomiarowych. Cały układ pomiarowy połączony jest z komputerem PC wyposażonym w program ThermoPro. Obróbkę termiczną próbek przeprowadzono w piecu z programatorem i sterownikiem temperatury zgodnie z przyjętym rozkładem „temperatura – czas”. Schemat stanowiska do wygrzewania próbek przedstawiono na rysunku 2.

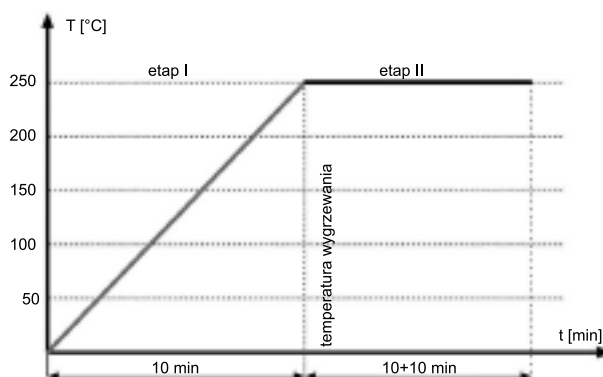
Po umieszczeniu próbek w piecu komorowym, na zewnętrznej powierzchni wybranej próbki zostały zamocowane dwie termopary pomiarowe. W czasie badań prowadzono również pomiar temperatury w środowisku pieca badawczego. Wygrzewanie próbek zostało po-



Rys. 2. Schemat stanowiska do wygrzewania próbek [Źródło: opracowanie własne]

cej całkowite zanurzenie próbek. Po 20 min. zanurzenia w roztworze, próbki zostały przeniesione do komory suszarki próżniowej. Impregnację przeprowadzono metodą próżniową przez 15 min, stosując podciśnienie 0,7 at. W sumie impregnacji poddano 44 próbki po 22 szt. z każdego gatunku drewna. Po wyjęciu

dzielone na dwie fazy. W fazie pierwszej, trwającej 10 min, nastąpił wzrost temperatury od 20 °C do 250 °C. Po tym czasie następowała faza druga, w której połowa próbek była wygrzewana w temperaturze 250 °C przez kolejne 10 min. Czas ten został ustalony podczas badań wstępnych. Był to najkrótszy czas pozwalający na osiągnięcie i wyrównanie założonej temperatury w całej objętości próbki. Schemat wygrzewania próbek przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat wygrzewania próbek [Źródło: opracowanie własne]

**Badania wytrzymałości na rozciąganie**

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FPZ 100/1. Wykonywano je ze stałą prędkością przesuwu trawersy wynoszącą 2 mm/min. Wytrzymałość na rozciąganie została obliczona zgodnie z normą PN-81/D-04107 [9] wg wzoru (1):

$$R_{rw} = \frac{P_{max}}{A} \tag{1}$$

gdzie:  
 P<sub>max</sub> – siła niszcząca próbkę [N];  
 A – przekrój poprzeczny próbki [mm<sup>2</sup>].

Przed umieszczeniem w maszynie wytrzymałościowej, w otworach na obydwu końcach próbki zostały zamocowane stalowe sworznie średnicy 9 – 9,5 mm i długości 15 – 17 mm, które miały zabezpieczyć próbkę przed zmiążdżeniem podczas jej montażu w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. Próbki zamocowane zostały w maszynie w taki sposób, aby części chwytowe pozostały wolne na długości 20 – 25 mm od strony pomiarowej. Następnie próbka była poddana obciążeniu rozciągającemu aż do jej zerwania w granicach części pomiarowej. Kierunek działania siły rozciągających pokrywał się z osią podłużną przewężonej części próbki. Cały proces próby rozciągania był rejestrowany. Za maksymalną siłę rozciągającą przyjmowano wartość siły, w której nastąpiło zniszczenie danej próbki.

**Analiza wyników badań**

W badaniach wytrzymałościowych wykorzystano 88 próbek po 44 sztuki z każdego wybranego gatunku drewna. W każdej założonej w badaniach temperaturze wykonano badania wytrzymałościowe 11 próbek. Parametry statystyczne uzyskanych wyników badań wytrzymałości na rozciąganie drewna sosnowego przedstawiono w tabeli 2, a drewna merbau (*Intsia Bijuga*) w tabeli 3. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie średniej wytrzymałości obydwu wybranych gatunków drewna nieimpregnowanego oraz impregnowanego SiO<sub>2</sub>, w temperaturze 20 °C oraz 250 °C, a na fotografii obrazy z mikroskopu skaningowego drewna sosny wykorzystanego w badaniach po ekspozycji w podwyższonej temperaturze.

Tabela 2. Wytrzymałość na rozciąganie impregnowanego i nieimpregnowanego drewna sosnowego

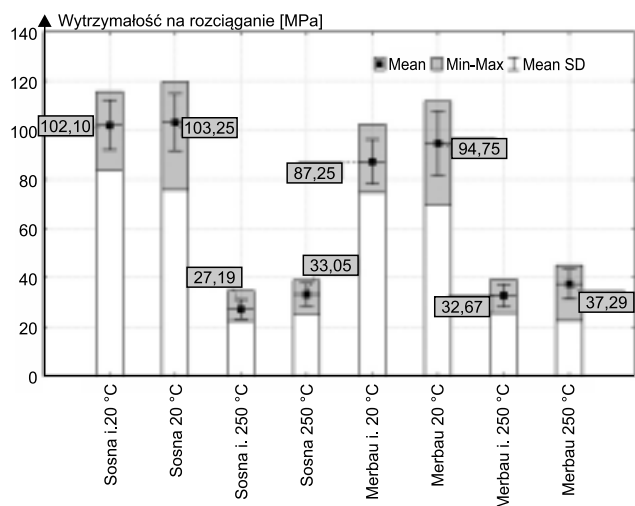
Temperatura badania [°C]	N	Impregnacja	Średnia [MPa]	Maksimum [MPa]	Minimum [MPa]	Odch. Std. [MPa]
20	11	SiO <sub>2</sub>	102,1	115,6	83,7	9,6
20	11	Brak	103,3	119,6	75,7	11,0
250	11	SiO <sub>2</sub>	27,2	34,5	22,4	3,8
250	11	Brak	33,1	38,8	25,3	4,4

[Źródło: opracowanie własne]

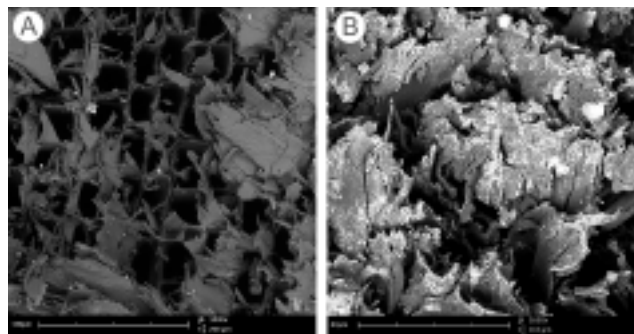
Tabela 3. Wytrzymałość na rozciąganie impregnowanego i nieimpregnowanego drewna merbau (*Intsia Bijuga*)

Temperatura badania [°C]	N	Impregnacja	Średnia [MPa]	Maksimum [MPa]	Minimum [MPa]	Odch. Std. [MPa]
20	11	SiO <sub>2</sub>	87,2	102,6	74,6	8,7
20	11	Brak	94,7	111,6	69,7	12,6
250	11	SiO <sub>2</sub>	32,7	39,2	25,6	4,3
250	11	Brak	37,3	44,9	22,5	5,7

[Źródło: opracowanie własne]

Rys. 4. Porównanie wytrzymałości wybranych gatunków drewna nieimpregnowanego oraz impregnowanego SiO<sub>2</sub> w temperaturze 20 °C oraz 250 °C

[Źródło: opracowanie własne]



Obraz SEM powierzchni drewna po ekspozycji w temperaturze 250 °C: A) nieimpregnowanego; B) impregnowanego

[Źródło: opracowanie własne]

## Podsumowanie i wnioski

Struktura drewna litego jest mało odporna na działanie wysokiej temperatury, co stanowi jedną z jego podstawowych wad. Pierwsze osłabienie struktury powodowane jest szybkim i niekon-

trolovanym obniżeniem wilgotności. Jednym ze skutków takiego zachowania jest spadek wytrzymałości, powodowany dekohezją oraz redukcją przekroju poprzecznego postępującą w warunkach podwyższonej i wysokiej temperatury o część zwęgloną.

Wnioski z przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników:

1) spadek wytrzymałości po ekspozycji w temperaturze 250 °C próbek nieimpregnowanych wykonanych z drewna sosnowego wynosi ok. 68%, natomiast w przypadku drewna merbau 61% w porównaniu z wytrzymałością uzyskaną w temperaturze 20 °C;

2) w przypadku drewna poddanego impregnacji krzemionką następuje spadek wytrzymałości drewna sosnowego o 73% po ekspozycji w temperaturze 250 °C, natomiast drewna egzotycznego ok. 63% w porównaniu z wytrzymałością drewna impregnowanego uzyskaną w temperaturze 20 °C;

3) impregnacja roztworem SiO<sub>2</sub> w nieznacznym stopniu pogarsza wytrzymałość na rozciąganie drewna sosnowego. Znacznie bardziej wpływa ona na wytrzymałość drewna egzotycznego merbau;

4) w temperaturze normalnej większą wytrzymałość na rozciąganie ma drewno sosnowe. Jest ona większa o 8,3% w przypadku drewna nieimpregnowanego i 14,6% impregnowanego SiO<sub>2</sub> w porównaniu z drewnem merbau;

5) po wstępnej obróbce termicznej w temperaturze 250 °C obserwowano większą wytrzymałość na rozciąganie drewna merbau: w przypadku próbek impregnowanych o 16,8% w porównaniu z próbkami sosnowymi. Natomiast porównując próbki nieimpregnowane, wytrzymałość ta jest większa o 11,3%;

6) odchylenia standardowe wyników pomiarów wytrzymałości drewna poddanego obróbce termicznej w 250 °C są znacznie mniejsze od odchyleń wyników wytrzymałości drewna badanych w temperaturze normalnej 20 °C;

7) w czasie ekspozycji próbek w temperaturze 250 °C nie następował zapłon powierzchni drewna zarówno nieimpregnowanego, jak i impregnowanego nanocząstkami SiO<sub>2</sub>.

Impregnacja ogniochronnym roztworem SiO<sub>2</sub> zmniejsza wytrzymałość drewna na rozciąganie. Nie wykazano korzystnego wpływu impregnacji na właściwości wytrzymałościowe drewna po ekspozycji w podwyższonej temperaturze.

## Literatura

- [1] Kozakiewicz P., Kościeliak C., Zakrzewska-Rudziska W.: Badania właściwości i innowacyjne zastosowania drewna egzotycznego w Polsce, *Przemysł Drzewny* 59 (2008) 18 – 23.
- [2] Sudoł E., Sulik P.: Problematyka wykorzystania drewna egzotycznego w zewnętrznych przegrodach budowlanych. *Budownictwo i Architektura* 12 (3) (2013) 27 – 34.
- [3] White R. H., Dietsberger M. A.: Wood Products: Thermal Degradation and Fire. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier Science Ltd 2001: 9712 – 9716.
- [4] Beall F. C., Eickner H. W.: Thermal degradation of wood components. *Forest Products Research Paper* 1970: 130 – 139.
- [5] Kamdem D. P., Pizzi A., Jermannaud A.: Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 2002; 60: 1 – 6.
- [6] Oszust M., Pieniak D., Ogrodnik P., Dec L.: Badanie spadku wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego termicznie w warunkach temperatur pożarowych. *Drewno* Vol. 54 Nr 185 (2011) 97 – 108.
- [7] Pieniak D., Ogrodnik P., Oszust M., Niewczas A.: Reliability of the thermal treated timber and wood-based materials in high temperatures. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (1): 18 – 24.
- [8] PN-EN 13556: Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia stosowana w handlu drewnem w Europie.
- [9] PN-81/D-04107: Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien.