

Marcin OSZUST, Daniel PIENIAK, Paweł OGRODNIK, Lesław DEC

BADANIE SPADKU WYTRZYMAŁOŚCI DREWNA ŚWIERKOWEGO MODYFIKOWANEGO TERMICZNIE W WARUNKACH TEMPERATUR POŻAROWYCH

Modyfikowanie termiczne drewna jest jedną z nowych technologii mających na celu poprawę jego właściwości. Drewno modyfikowane termicznie (TT) charakteryzuje się innymi parametrami użytkowo-estetycznymi niż drewno naturalne niemodyfikowane (NTT).

Celem badań była ocena wpływu temperatur występujących w środowisku pożaru na zmiany wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego termicznie. Badania zostały wykonane na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym z możliwością oddziaływania wysokich temperatur. Określono wartości wytrzymałości przy rozciąganiu, ściskaniu oraz zginaniu w temperaturach normalnych i pożarowych. Zaprezentowano analizę porównawczą spadku wytrzymałości drewna świerkowego TT i drewna świerkowego NTT. Wykazano istotny wpływ temperatur pożarowych na spadek wytrzymałości badanego drewna, postępujący w kolejnych przedziałach temperatur.

Słowa kluczowe: temperatury pożarowe, drewno modyfikowane termicznie, drewno niemodyfikowane termicznie, drewno świerkowe, wytrzymałość.

Wstęp

Drewno jest jednym z podstawowych materiałów stosowanych w konstrukcjach inżynierskich. Na poziomie mikrostrukturalnym drewno jest niehomogenicznym kompozytem komórkowym, kompozycją celulozy, hemicelulozy, ligniny i innych mniej znaczących składników [Younsi i in. 2010]. Celuloza stanowi największą część objętości drewna, składa się ona z długich łańcuchów węglowych, które są najistotniejsze dla wytrzymałości drewna. Hemiceluloza składa się z rozgałęzio-

Marcin OSZUST, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa, Polska
e-mail: mechanika@sgsp.edu.pl

Daniel PIENIAK, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa, Polska

Paweł OGRODNIK, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa, Polska

Lesław DEC, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa, Polska

nych polimerów amorficznych, wypełnia ona obszar pomiędzy celulozą i ligniną w strukturze drewna. Lignina jest polimerem amorficznym odpowiedzialnym za kohezję struktury drewna, jest ona czynnikiem „sklejającym” strukturę [Manriquez, Moraes 2010].

Drewno poddane termicznej modyfikacji jest coraz powszechniej wykorzystywane w Polsce. Modyfikacja termiczna drewna poprawia niektóre jego właściwości i walory estetyczne. Większość dostępnego na rynku drewna modyfikowanego termicznie to gatunki drewna krajowego liściastego i iglastego w tym świerkowego. Drewno termicznie modyfikowane jest ciekawą alternatywą dla gatunków drewna egzotycznego. Modyfikacja struktury drewna wpływa na poprawę jego niektórych właściwości fizyko-mechanicznych, w szczególności stabilności wymiarowej, odporność biologiczną (głównie poprzez zwiększenie odporności na szkodliwe oddziaływanie grzybów) oraz higroskopijność jego struktury [Mazela i in. 2004; Kartal i in. 2008]. Modyfikacja termiczna poprzez zmniejszenie higroskopijności struktury ma również znaczenie dla poziomu pochłaniania przez drewno wilgotności [Obataya i in. 2000]. Poprawa tej właściwości następuje w wyniku zmian składu chemicznego drewna, głównie w wyniku degradacji hemicelulozy [Gunduz, Aydemir, Karakas 2009]. Proces termicznej modyfikacji drewna prowadzi się zazwyczaj w zakresie temperatur od 160 do 280°C [Fengel, Wegener 1989]. Czas ekspozycji drewna zależy m.in. od wielkości elementów poddawanych modyfikacji termicznej oraz ich wilgotności i wynosi od 15 minut do 24 godzin. Wiadomo, że termiczna modyfikacja drewna prowadzona w niektórych przypadkach oraz przy pewnych określonych temperaturach i czasach ekspozycji może powodować spadek wytrzymałości doraźnej drewna.

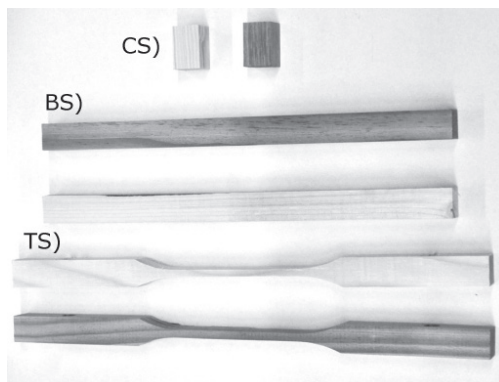
Drewno jest materiałem palnym, podlegającym termicznej degradacji. W warunkach pożaru konstrukcja drewniana jest jednocześnie poddana oddziaływaniu wymuszeń w formie sił oraz oddziaływaniom termicznym. Jednoczesne oddziaływanie tych dwóch czynników wpływa na rozkład naprężeń w strukturze drewna oraz ogranicza nośność konstrukcji. Wysokie temperatury pożaru powodują dekohezję struktury, a zauważalna redukcja wytrzymałości drewna następuje w temperaturach większych od 65°C [Bednarek, Kaliszuk-Wietecha 2004; Bednarek, Ogrodnik, Pieniak 2010]. Na poziomie strukturalnym degradacja wysuszonej celulozy następuje w temperaturze około 300°C, jednakże degradacja hemicelulozy następuje już w zakresie temperatur od 150 do 200°C. Dekompozycja ligniny, stanowiącej o spoiwości struktury drewna następuje w zakresie temperatur pomiędzy 220 a 250°C [Kamdem, Pizzi, Jermannaud 2002]. Ustalono również, że dehydratacja ligniny następuje w temperaturze 200°C.

Celem badań jest określenie wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego i niemodyfikowanego termicznie w symulowanych warunkach termicznych pożaru, w zakresie poniżej temperatury zapłonu drewna, przy jednoczesnej realizacji obciążenia statycznego.

Material i metoda

Badany materiał

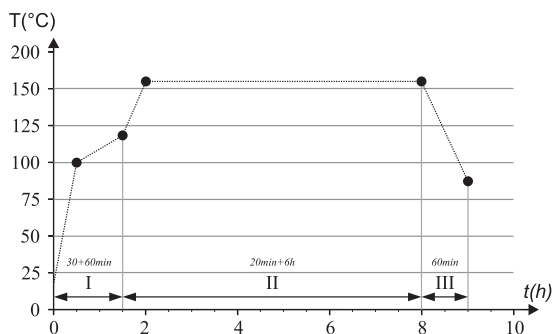
Badaniu poddano drewno świerkowe. Próbki wykorzystane w badaniach wytrzymałościowych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Próbki drewna modyfikowanego TT (ciemniejsze) i niemodyfikowanego termicznie NTT (jaśniejsze): TS - próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie, BS - próbki zginane, CS - próbki ściskane

Fig. 1. Samples of thermally modified timber TT (darker) and non-modified timber NTT (lighter): TS – samples for tensile strength tests, BS – samples for bending strength tests, CS – samples for compression strength tests

Termiczną modyfikację drewna przeprowadzono trzyfazowo (rys.2). Faza pierwsza - wstępnego ogrzewania - polegała na nagrzaniu suszarki i załadunku próbek, doprowadzeniu temperatury do 100°C. Przewidziany czas operacji wynosił około 30 min. Następnie stopniowo podnoszono temperaturę do 120°C przez 60 min. W tym czasie następował proces suszenia drewna, którego wilgotność spadała prawie do zera.



Rys. 2. Proces modyfikacji termicznej drewna [opracowanie własne]

Fig. 2. Timber thermal modification process [own study]

Faza druga - intensywnego nagrzewania - miała zasadniczy wpływ na efekt finalny modyfikacji. Polegała na podniesieniu temperatury do 160°C w ciągu 20 min i przetrzymaniu próbek w tej temperaturze około 6 godzin.

Faza trzecia - schładzania i klimatyzacji - obejmowała obniżenie temperatury w suszarce do 80-90°C w czasie 60 min. Po tej operacji próbki były pakowane w folię aluminiową.

Badanie wytrzymałości

Badania wytrzymałościowe wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FPZ 100/1 (VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein, Germany), która umożliwia obciążenie siłą statyczną oraz utrzymanie jej w układzie pionowym na stałym, założonym poziomie. Maksymalna, wytwarzana przez maszynę siła statyczna wynosi 100kN. Maszyna posiada cztery zakresy prędkości przesuwu trawersy. W czasie badań zastosowano zakres prędkości I/III, pozwalający na przesuw trawersy z prędkością $0,021 \pm 0,84$ mm/min.

Do obliczenia wytrzymałości na zginanie wykorzystano równanie

$$R_{\text{m}} = \frac{3 P_{\text{max}} \cdot l}{2b \cdot h^2} \quad (1)$$

gdzie: P_{max} – siła niszcząca próbkę [N],
 l – długość próbki [mm],
 b – szerokość próbki [mm],
 h – wysokość próbki [mm].

Wytrzymałość na rozciąganie obliczono na podstawie równania:

$$R_{\text{m}} = \frac{P_{\text{max}}}{A} \quad (2)$$

gdzie: P_{max} – siła niszcząca próbkę [N],
 A – przekrój próbki [mm²].

Wytrzymałość na ściskanie obliczono na podstawie równania:

$$R_{\text{m}} = \frac{P_{\text{max}}}{A} \quad (3)$$

gdzie: P_{max} – siła niszcząca próbkę [N],
 A – przekrój próbki [mm²].

Symulacja temperatur pożarowych

Przed rozpoczęciem badań wytrzymałości przeprowadzono badania wstępne, w których ustalono zakresy temperatur eksperymentu oraz określono czasy ekspozycji próbek do momentu wyrównania temperatury w całej objętości próbki. W badaniach wstępnych w próbkach wykonywano otwór, w którym umieszczano termoparę, w celu dokonania pomiaru temperatur w geometrycznym środku próbki. Czas nagrzewania określono jako czas, po którym termoparą umieszczoną wewnątrz próbki zmierzono temperaturę przyjętą w planie badań.

Jako wyjściową przyjęto temperaturę otoczenia równą 20°C. Temperaturę graniczną określono na poziomie 230°C. Jest to temperatura bliska temperaturze zapłonu powierzchni drewna. Dodatkowe badania przeprowadzono dla następujących temperatur: 50°C, 100°C oraz 150°C.

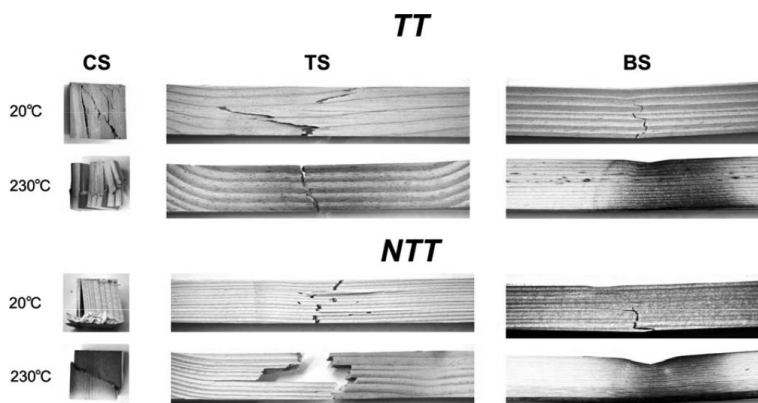
W badaniach podstawowych dokonano pomiaru temperatur na powierzchni próbki za pomocą dwóch termopar rozmieszczonych stycznie do powierzchni bocznych próbki (rys. 3b). Obciążenie próbki następowało po osiągnięciu założonej temperatury i utrzymaniu jej przez czas ustalony podczas badań wstępnych. W czasie rzeczywistym rejestrowano wartości sił niszczących oraz temperaturę. Wzrost temperatury w komorze podczas badania uzyskano przez zastosowanie urządzenia umożliwiającego nawiew gorącego powietrza (GHG 650 LCE, Bosch, Germany). Zakres temperatur uzyskiwanych u wylotu dyszy wynosił 50-560°C, a strumień gorącego powietrza można było regulować w zakresie 250-500 l/min.

Wyniki badań

Wyniki badań wytrzymałości resztkowych w temperaturach pożarowych

Badanie w każdym z elementarnych przypadków obciążenia przeprowadzono na 42 próbkach z drewna niepoddanego modyfikacji termicznej (NTT) i na 42 poddanych modyfikacji termicznej (TT), po 7 próbek w każdym przedziale temperatury. Fotografie próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym w podwyższonych temperaturach przedstawiono na rys. 3.

Parametry statystyczne uzyskanych wyników badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 1, wyników badań wytrzymałości na rozciąganie w tabeli 2.



Rys. 3. Próbkki po próbach wytrzymałości w temperaturach pożarowych: TT – drewno modyfikowane termicznie, NTT – drewno nie poddane modyfikacji termicznej, CS – próbkki poddane próbie ściskania, TS – próbkki poddane próbie rozciągania, BS – próbkki poddane próbie zginania

Fig. 3. The samples after tests for strength under fire temperatures: TT – thermally modified timber, NTT – non-modified timber, CS – samples after compression strength test, TS – samples after tensile strength test, BS – samples after bending strength test

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie

Table 1. The results of bending strength tests

Temperatura [°C] <i>Temperature [°C]</i>	Wytrzymałość na zginanie R_{bw} [MPa] <i>Bending strength R_{bw} [MPa]</i>					
	Liczba próbek <i>Number of samples</i>	Średnia <i>Average</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maksimum <i>Maximum</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	Odchylenie standardowe % <i>Standard deviation %</i>
NTT						
20NTT	7	79,71	72,00	85,50	5,33	6,69
50NTT	7	67,50	60,75	74,25	4,86	7,20
100NTT	7	53,68	45,00	60,75	5,42	10,10
150NTT	7	49,50	38,25	83,25	15,91	32,14
200NTT	7	38,57	33,75	42,75	3,54	9,18
230NTT	7	33,11	27,00	38,25	4,05	12,23
TT						
20TT	7	89,68	83,25	96,75	4,93	5,50
50TT	7	87,43	83,25	92,25	3,03	3,46
100TT	7	72,64	67,50	76,50	3,11	4,27
150TT	7	67,18	63,00	72,00	3,54	5,27
200TT	7	61,07	56,25	67,50	3,99	6,53
230TT	7	51,75	45,00	56,25	4,31	8,33

TT – drewno modyfikowane termicznie; *TT – thermally modified timber*

NTT – drewno niepoddane modyfikacji termicznej; *NTT – non-modified timber*

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie
Table 2. The results of tensile strength tests

Temperatura [°C] <i>Temperature [°C]</i>	Wytrzymałość na rozciąganie R_{rw} [MPa] <i>Tensile strength R_{rw} [MPa]</i>					
	Liczba próbek <i>Number of samples</i>	Średnia <i>Average</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maksimum <i>Maximum</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	Odchylenie standardowe % <i>Standard deviation %</i>
NTT						
20NTT	7	93,86	78,00	108,00	9,97	10,63
50NTT	7	80,64	61,50	102,00	15,56	19,29
100NTT	7	46,71	34,00	56,00	8,52	18,24
150NTT	7	44,00	32,00	59,00	10,02	22,77
200NTT	7	34,29	19,00	47,00	10,31	30,06
230NTT	7	21,43	5,00	32,00	8,45	39,42
TT						
20TT	7	65,00	55,00	81,00	8,87	13,65
50TT	7	38,00	26,00	48,00	8,27	21,75
100TT	7	21,71	7,00	34,00	8,94	41,17
150TT	7	21,36	11,00	34,00	10,20	47,76
200TT	7	17,00	4,00	27,00	8,70	51,17
230TT	7	8,14	1,00	14,00	4,67	57,35

TT – drewno modyfikowane termicznie; *TT – thermally modified timber*

NTT – drewno niepoddane modyfikacji termicznej; *NTT – non-modified timber*

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie
Table 3. The results of compression strength tests

Temperatura [°C] <i>Temperature [°C]</i>	Wytrzymałość na ściskanie R_{cw} [MPa] <i>Compression strength R_{cw} [MPa]</i>					
	Liczba próbek <i>Number of samples</i>	Średnia <i>Average</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maksimum <i>Maximum</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>	Odchylenie standardowe % <i>Standard deviation %</i>
NTT						
20NTT	7	32,86	25,50	39,00	4,81	14,64
50NTT	7	48,14	41,50	53,25	4,43	9,20
100NTT	7	26,32	22,00	37,75	5,59	21,22
150NTT	7	25,25	19,00	29,25	3,71	14,67
200NTT	7	27,18	21,50	31,50	4,07	14,99
230NTT	7	24,86	19,75	28,00	3,49	14,03
TT						
20TT	7	60,11	51,75	66,50	6,18	10,29
50TT	7	49,50	41,50	56,00	4,63	9,35

Tabela 3. Ciąg dalszy

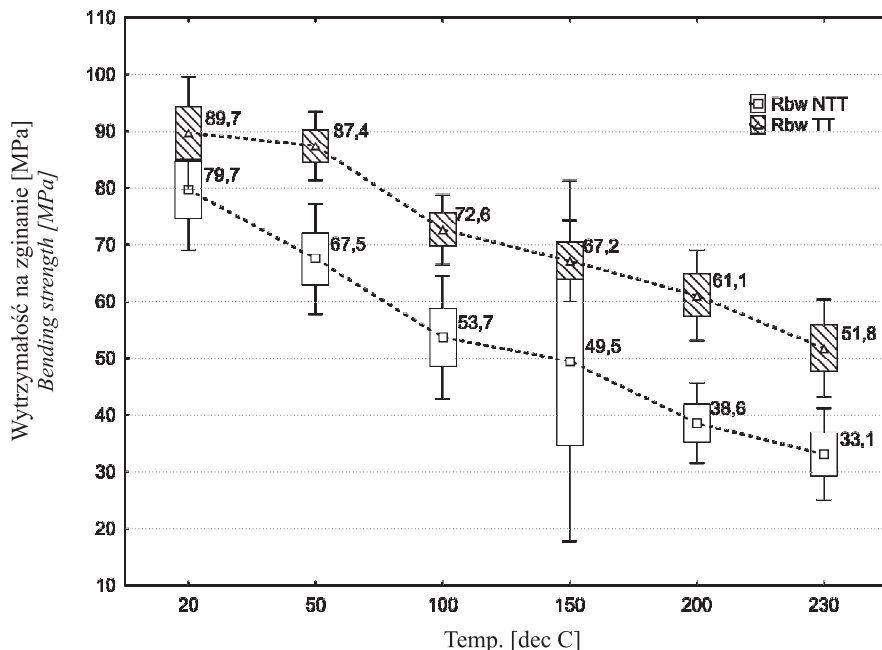
Table 3. Continued

Temperatura [°C] <i>Temperature</i> [°C]	Wytrzymałość na ściskanie R_{cw} [MPa] Compression strength R_{cw} [MPa]					
	Liczba próbek <i>Number</i> <i>of samples</i>	Średnia <i>Average</i>	Minimum <i>Minimum</i>	Maksimum <i>Maximum</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard</i> <i>deviation</i>	Odchylenie standardowe % <i>Standard</i> <i>deviation %</i>
100TT	7	44,11	38,00	52,50	5,46	12,38
150TT	7	41,39	38,00	45,75	2,76	6,68
200TT	7	26,25	21,00	33,25	4,21	16,04
230TT	7	23,18	18,25	29,00	4,06	17,50

TT – drewno modyfikowane termicznie; TT – *thermally modified timber*

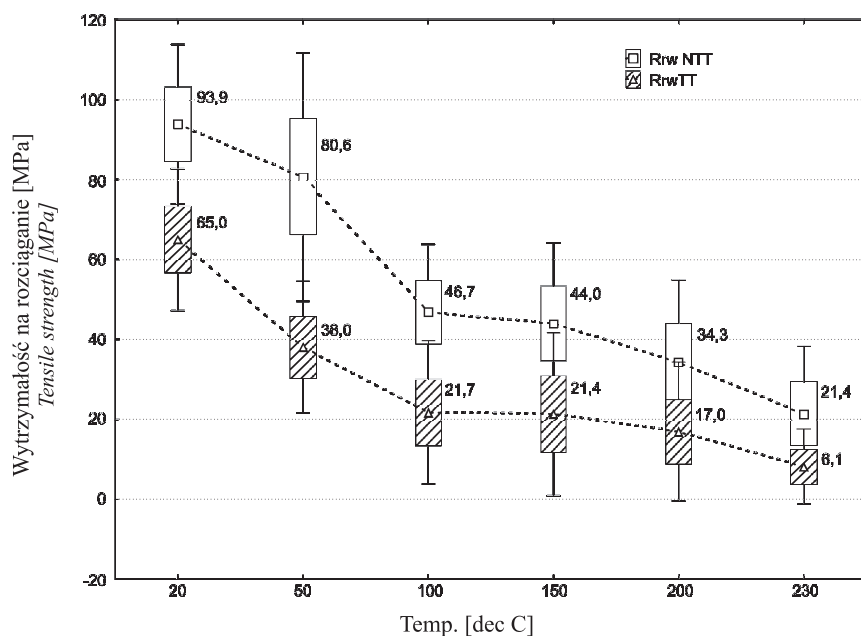
NTT – drewno niepoddane modyfikacji termicznej; NTT – *non-modified timber*

Graficzne miary zmienności rozkładów statystycznych wyników pomiarów wytrzymałości w kolejnych przedziałach temperatury, ich poziomy i rozrzut statystyczny przedstawiono na wykresach (rys. 4, 5 i 6). Punkty na wykresach określają wartości średnie wytrzymałości, ramki określają poziomy ufności (95%), natomiast tzw. „wąsy” określają odchylenia standardowe.

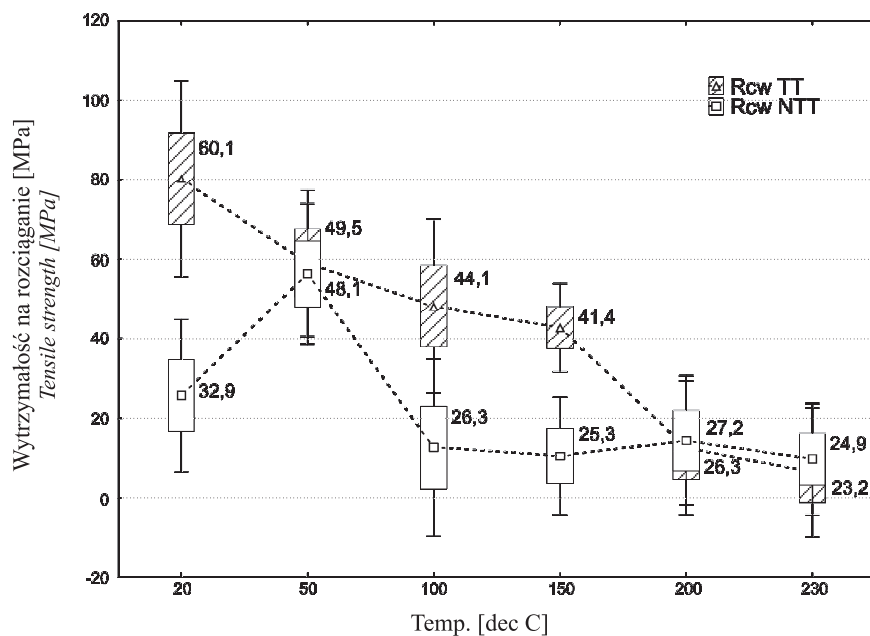


Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie

Fig. 4. The results of bending strength tests



Rys. 5. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie
Fig. 5. The results of tensile strength tests



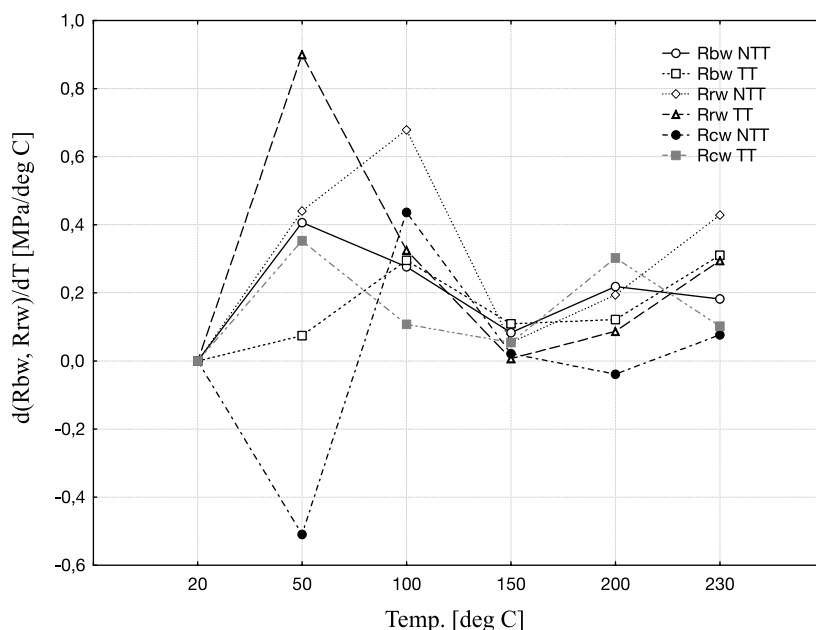
Rys. 6. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie
Fig. 6. The results of compression strength tests

Intensywność spadku wytrzymałości w warunkach temperatur pożarowych

Intensywność spadku wytrzymałości drewna w wyniku ekspozycji w wysokich temperaturach określono na podstawie poniższego równania:

$$D_R = \frac{d(R_{bw}, R_{rw}, R_{cw})}{dT} \quad (4)$$

gdzie: R_{bw} – wytrzymałość na zginanie [MPa],
 R_{rw} – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],
 R_{cw} – wytrzymałość na ściskanie [MPa],
 T – temperatura [°C].



Rys. 7. Intensywność zmian wytrzymałości w zależności od temperatury

Fig. 7. The intensity of changes in strength depending on the temperature

Podsumowanie i wnioski

W badaniach oceniano wpływ temperatur pożarowych na wytrzymałość drewna świerkowego modyfikowanego termicznie w celu wnioskowania o możliwości wykorzystania tego materiału w konstrukcjach inżynierskich. Oceniano wpływ modyfikacji termicznej poprzedzającej ekspozycję w podwyższonych temperaturach symulujących temperatury pożaru, co pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wpływ temperatur pożarowych na spadek wytrzymałości jest jednoznaczny. W przypadku drewna świerkowego poddanego modyfikacji termicznej (TT) spadek wytrzymałości na zginanie w temperaturze 230°C wynosił 42%, natomiast w przypadku drewna niepoddanego modyfikacji termicznej (NTT) 58% w odniesieniu do uzyskanej w temperaturze 20°C.
2. W badaniach wykazano istotny wpływ wysokich temperatur na spadek wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego (TT) i niemodyfikowanego (NTT) termicznie.
3. Odchylenia standardowe wyników pomiarów wytrzymałości drewna TT są znacząco mniejsze od odchylenia wyników wytrzymałości drewna NTT.
4. W przypadku próbek poddanych obciążeniom zginającym obserwowano mniejszą wytrzymałość drewna NTT we wszystkich zakresach temperatury, jednakże wytrzymałości na zginanie drewna TT i NTT w temperaturze normalnej (20°C) były zbliżone.
5. W próbie rozciągania, obserwowano mniejszą wytrzymałość drewna TT we wszystkich przedziałach temperatury. Odchylenia standardowe wyników wytrzymałości na rozciąganie są bardzo duże, szczególnie duże w przypadku drewna TT. Odchylenia wzrastają znacząco w kolejnych zakresach temperatury, świadczy to o większej losowości wytrzymałości.
6. Różnice pomiędzy wytrzymałością na zginanie drewna TT i NTT o wysokim poziomie istotności statystycznej potwierdzają również wyniki testu Scheffe. Wykazano istotne różnice wytrzymałości drewna TT we wszystkich grupach determinowanych temperaturą ekspozycji w stosunku do odpowiedników wyników dla drewna NTT

Literatura

- Beall F.C., Eickner H.W.** [1970]: Thermal degradation of wood components. Forest Products Research Paper. FPL 130
- Bednarek Z., Kaliszek-Wietecha A.** [2004]: Badanie wpływu impregnacji próżniowo – ciśnieniowej na wytrzymałość drewna. *Inżynieria i Budownictwo* [4]: 213-215
- Bednarek Z., Kaliszek-Wietecha A.** [2007]: Analysis of the fire-protection impregnation influence on wood strength. *Journal of Civil Engineering and Management* [13]: 79-85
- Bednarek Z., Ogrodnik P., Pieniak D.** [2010]: Wytrzymałość na zginanie i niezawodność kompozytu drewnianego LVL w warunkach podwyższonych temperatur. *Zeszyty Naukowe SGSP* [40]
- Fengel D., Wegener G.** [1989]: Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, Walter de Gruyter
- Gunduz G., Aydemir D., Karakas G.** [2009]: The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) Wood and changes in physical properties. *Materials and Design* [30]: 4391-4395
- Jamsa S., Viitaniemi P.** [2001]: Heat treatment of wood. Better durability without chemicals. In: Review on Heat treatment of wood. Rapp AO (ed) Proceedings of Special Seminar, Antibes

- Kamdem D.P., Pizzi, A., Jermannaud, A.** [2002]: Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff* [60]: 1–6
- Kartal S.N., Hwang W.J., Imamura Y.** [2008]: Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood. *Journal of Materials Processing Technology* [198]: 234–240
- Korkut S., Akgul M., Dundar T.** [2008]: The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology* [99]: 1861–1868
- Manríquez M.J., Moraes P.D.** [2010]: Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá. *Construction and Building Materials* [24]: 99–104
- Mazela B., Zakrzewski R., Grześkowiak W., Cofta G., Bartkowiak M.** [2004]: Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes. *Wood Technology* [7]: 253–262
- Obataya E, Tanaka F, Norimoto M, Tomita B.** [2000]: Hygroscopicity of heat-treated wood 1. Effects of after-treatments on the hygroscopicity of heat-treated wood. *Journal of Wood Science* [46]: 77–87
- Younsi R., Kocaefe D., Poncsak S., Kocaefe Y.** [2010]: Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on ThermoWood technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [37]: 21–28

THE INVESTIGATION OF IMMEDIATE STRENGTH LOSS OF THERMALLY MODIFIED SPRUCE TIMBER UNDER FIRE TEMPERATURES

Summary

Thermal modification of timber is one of the new technologies aiming at the improvement of timber properties. Thermally modified timber (TT) has different aesthetic and utility parameters compared to non-modified timber (NTT). The objective of this study was the assessment of the influence of temperatures present in fire conditions on the immediate changes in strength of thermally modified spruce timber. Tests were made at a dedicated test stand equipped with a possibility of producing impact with high temperatures. The values of tensile strength, compression strength and bending strength in normal and fire temperatures conditions were determined. This paper presents a comparative analysis of the strength loss of TT spruce timber and NTT spruce timber. The study confirmed a significant influence of fire temperatures on the strength loss of tested timber in chosen ranges of increasing temperatures.

Keywords: fire temperatures, thermally modified timber, non-modified timber, spruce timber, tensile strength, compression strength, bending strength