

Paweł OGRODNIK¹
Daniel PIENIAK¹

BADANIE WPŁYWU PODWYŻSZONYCH TEMPERATUR NA WYTRZYMAŁOŚĆ DREWNA MODYFIKOWANEGO TERMICZNIE

Drewno ze względu na swoje właściwości jest wykorzystywane w konstrukcjach inżynierskich. Często drewno naturalne poddawane jest modyfikacjom, których celem jest m.in. poprawa jego właściwości estetycznych i technologicznych. Modyfikacja termiczna drewna umożliwia poprawę tych właściwości. Konstrukcje zawierające struktury tego typu tak jak większość innych narażone są na ryzyko wystąpienia pożaru. W przypadku większość materiałów konstrukcyjnych oddziaływanie temperatur w warunkach pożaru ma wpływ na ich degradację, przejawiającą się utratą wytrzymałości. Celem prezentowanych w artykule badań była ocena porównawcza wpływu temperatur środowiska pożaru na wytrzymałość drewna świerkowego poddanego i niepoddanego modyfikacji termicznej.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE ON THE STRENGTH OF WOOD MODIFIED THERMALLY

On account of its properties, wood is used in temporary structures. Natural wood is often modified to improve its esthetic and technological features. One of such a method is thermal modification. Constructions including wood are also exposed to the fire risk. Significant decrease of the strength is often the result of high temperature affecting in most cases of structural materials. The main purpose of the experiments presented in this paper was a comparative evaluation of the influence of fire temperature on the strength of spruce wood modified and unmodified thermally.

1. WSTĘP

Drewno oraz kompozyty drewnopochodne są coraz częściej wykorzystywane w konstrukcjach inżynierskich. Drewno jest niehomogenicznym kompozytem komórkowym, kompozycją celulozy, hemicelulozy, ligniny i innych mniej znaczących składników [1]. Celuloza stanowi największą część objętości drewna, składa się ona z długich łańcuchów

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Mechaniki Stosowanej, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa, tel. (022) 5617544, e-mail: mechanika@sgsp.edu.pl

węglowych, które są najistotniejsze dla wytrzymałości drewna. Hemiceluloza składa się z rozgałęzionych 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 [2].

Termiczna modyfikacja struktury drewna konstrukcyjnego wpływa na poprawę jego parametrów [3], w szczególności ma wpływ na poprawę stabilności wymiarowej elementów drewnianych, odporność biologiczną drewna (głównie poprzez zwiększenie odporności na szkodliwe oddziaływanie grzybów), oraz higroskopijność jego struktury [4]. Modyfikacja termiczna poprzez zmniejszenie higroskopijności struktury ma również znaczenie dla poziomu pochłanianej przez drewno wilgotności [5], poprawa tej właściwości struktury następuje w wyniku zmian składu chemicznego drewna, głównie w wyniku degradacji hemicelulozy [6]. Proces ten wpływa również na poprawę odporności na agresywne oddziaływania środowiska, zwiększenie odporności na próchnicę drewna oraz co jest istotne ze względów estetycznych pozwala uzyskać ciemny dekoracyjny kolor [7]. Proces termicznej modyfikacji drewna następuje zazwyczaj w zakresie temperatur 160 do 280°C [8], czas ekspozycji drewna zależy m.in. od wielkości elementów poddawanych modyfikacji termicznej oraz ich wilgotności i wynosi od 15 minut do 24 godzin. Jest wiadome, że termiczna modyfikacja drewna prowadzona w niektórych przypadkach oraz przy pewnych określonych temperaturach i czasach ekspozycji może powodować spadek wytrzymałości drewna. Wysokie temperatury występujące w procesie termicznej modyfikacji drewna powodują dekompozycję i degradację polimerów drewna, zmniejsza się również znacząco wilgotność drewna. Degradacja wysuszonej celulozy następuje w temperaturze około 300°C, jednakże degradacja hemicelulozy następuje już w zakresie temperatur od 150 do 200°C, ponadto dekompozycja ligniny stanowiącej o spoiwości struktury drewna następuje w zakresie temperatur pomiędzy 220 a 250°C [9,10], ustalono również, że dehydratacja ligniny następuje w temperaturze 200°C.

Wykorzystanie drewna modyfikowanego termicznie w konstrukcjach inżynierskich, w których występują zagrożenia związane z wystąpieniem ryzyka pożaru, wymusza przeprowadzenie badań polegających na ocenie spadku wytrzymałości w warunkach temperatur pożarowych. Wykonywane dotychczas przez autorów próby na typowych stanowiskach wytrzymałościowych z wstępnym nagraniem próbek w piecu a następnie z przenoszeniem na stanowisko badawcze powodowały duże rozrzuty wyników badań. W związku z tym w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie zaprojektowane i zbudowano specjalne stanowisko do badań wytrzymałościowych z możliwością jednoczesnego ogrzewania próbek bezpośrednio na stanowisku oraz jednoczesnej realizacji obciążenia statycznego. Badania porównawcze drewna poddanego i niepoddanego modyfikacji termicznej, przeprowadzone na wyżej wymienionym stanowisku przedstawiono w tej publikacji.

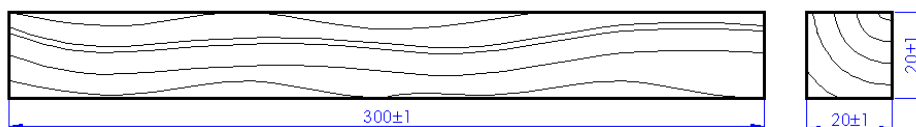
2. MATERIAŁ I METODA

2.1. Materiał

Próbki do badań zostały wykonane zgodnie PN-72/C-04907. Próbki poddane i nie poddane modyfikacji termicznej były identyczne, wykonano je z drewna świerkowego. Próbki nie poddane modyfikacji termicznej (NTT) były leżakowane w temperaturze 20°C

w pomieszczeniu zamkniętym, próbki poddane modyfikacji termicznej (TT) do czasu modyfikacji były przechowywane w ten sam sposób.

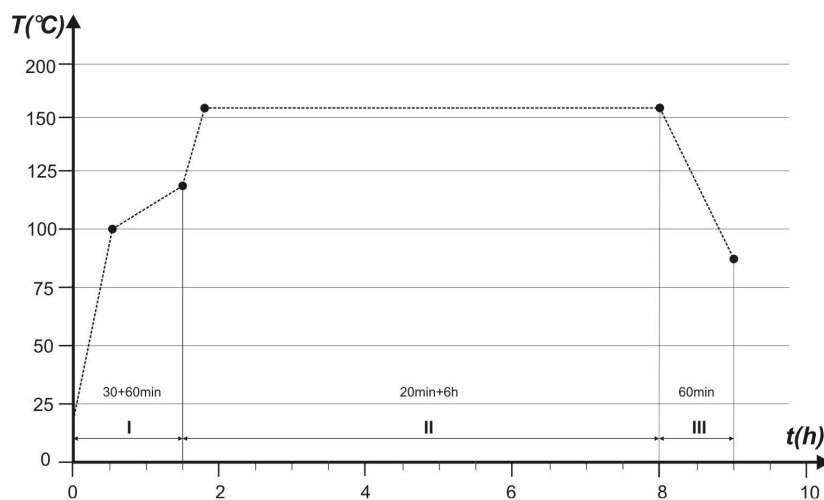
Wymiary próbek z drewna modyfikowanego i niemodyfikowanego były identyczne. Próbki do badań wytrzymałości na zginanie statyczne zostały wykonane w formie prostopadłościanów o wymiarach 20x20x300 mm (rys. 1).



Rys.1. Próбка do badania wytrzymałości na zginanie

2.2. Termiczna modyfikacja drewna

Termiczną modyfikację drewna przeprowadzono trzy fazowo (rys.2). Faza pierwsza - wstępnego ogrzewania polegała na nagraniu suszarki i załadunku próbek, doprowadzeniu temperatury do 100°C, przewidziany czas operacji wynosił około 30 min. Następnie stopniowe podnoszenie temperatury do 120°C, przez 60 min. W tym czasie następuje proces suszenia drewna, a jego wilgotność spada prawie do zera.



Rys. 2. Proces modyfikacji termicznej drewna

Faza druga - intensywnego nagrzewania. Faza ta, 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 6h.

Faza trzecia - schładzania i klimatyzacji. Następowало w niej obniżenie temperatury w suszarce do 80-90°C, czas trwania wynosił 60 min. W tej fazie następowało stopniowe wychładzanie próbek. Po tej operacji próbki były pakowane w folię aluminiową.

2.3. Symulacja obciążenia w podwyższonych temperaturach

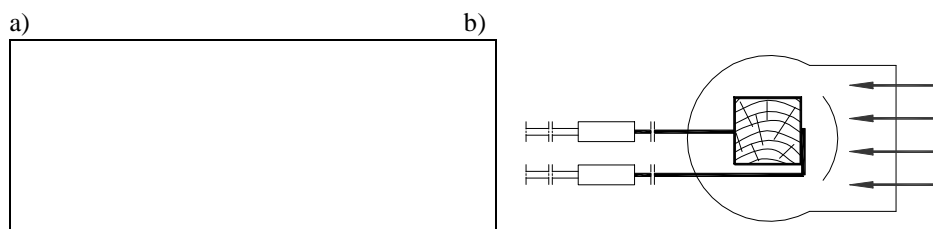
Badanie wytrzymałości na zginanie przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FPZ 100/1 (VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein, Germany), która umożliwia obciążenie siłą statyczną oraz utrzymania jej w układzie pionowym na stałym założonym poziomie. Maksymalna wytwarzana przez maszynę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

Do obliczenia wytrzymałości na zginanie wykorzystano równanie (1):

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

gdzie: P_{max} – siła niszcząca próbkę
 l – długość próbki
 b – szerokość próbki
 h – wysokość próbki

Przed rozpoczęciem badań podstawowych przeprowadzono badania wstępne, których celem było ustalenie zakresów temperatur eksperymentu oraz określenie czasów wygrzewania próbek do wyrównania temperatury w całej objętości próbki. W badaniach wstępnych w próbkach wykonywano otwór, w którym umieszczano termoparę, celem dokonania pomiaru temperatur w geometrycznym środku próbki (rys. 3a). Czas nagrzewania określono jako czas, po którym termoparą umieszczoną wewnątrz próbki zmierzono temperaturę przyjętą w planie badań.



Rys. 3: a) Schemat układu podczas badań wstępnych celem określenia czasu nagrzania próbki; b) Schemat układu termoelementów w czasie badań podstawowych

Jako wyjściową przyjęto temperaturę otoczenia równą 20°C . Temperaturę graniczną określono na poziomie 230°C , jest to temperatura bliska temperaturze zapłonu powierzchni drewna. Istotną temperaturą badań była także temperatura 100°C - przy tej temperaturze następuje odparowanie wody. Dodatkowo badania przeprowadzone dla następujących zakresów temperatury: 50°C , 100°C oraz 150°C .

W badaniach podstawowych prowadzono pomiary 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 poprzez 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 250-500l/min.

3. WYNIKI BADAŃ

Badanie przeprowadzono na 42 próbkach z drewna niepoddanego modyfikacji termicznej (NTT) i na 42 poddanych modyfikacji termicznej (TT), po 7 próbek w każdym przedziale temperatury. Parametry statystyczne uzyskanych wyników badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 1.

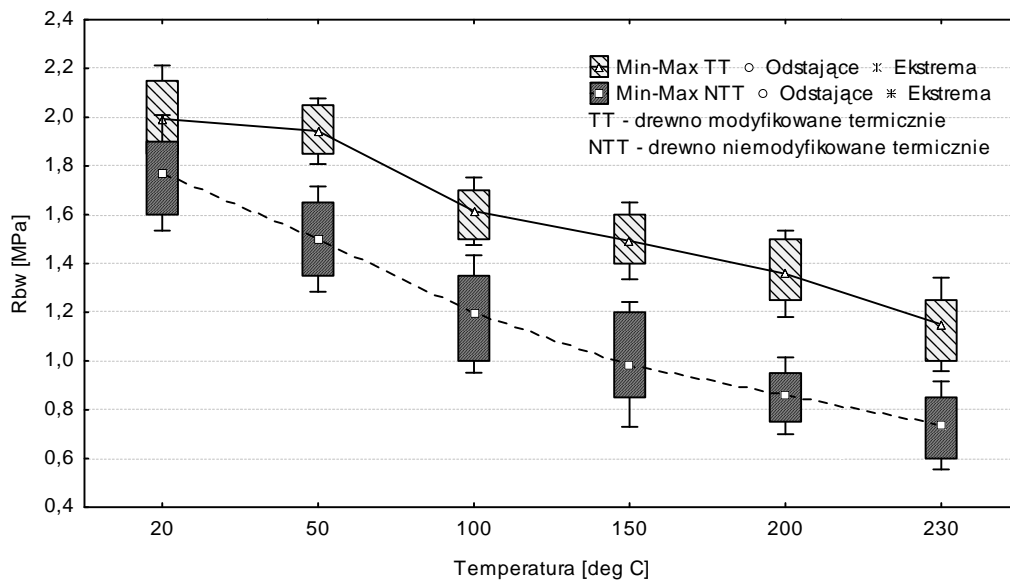
Tab. 1. Statystyki opisowe wyników badań wytrzymałości na zginanie

Temp. [°C]	Wytrzymałość na zginanie R_{bw} [MPa]						
	N	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch.std.	Odch.std. %
20NTT	7	1,77	1,85	1,60	1,90	0,12	6,69
50NTT	7	1,50	1,50	1,35	1,65	0,11	7,20
100NTT	7	1,19	1,20	1,00	1,35	0,12	10,10
150NTT	7	0,99	1,00	0,85	1,20	0,13	13,00
200NTT	7	0,86	0,85	0,75	0,95	0,08	9,18
230NTT	7	0,74	0,75	0,60	0,85	0,09	12,23
20TT	7	1,99	1,95	1,85	2,15	0,11	5,50
50TT	7	1,94	1,95	1,85	2,05	0,07	3,46
100TT	7	1,61	1,65	1,50	1,70	0,07	4,27
150TT	7	1,49	1,45	1,40	1,60	0,08	5,27
200TT	7	1,36	1,35	1,25	1,50	0,09	6,53
230TT	7	1,15	1,15	1,00	1,25	0,10	8,33

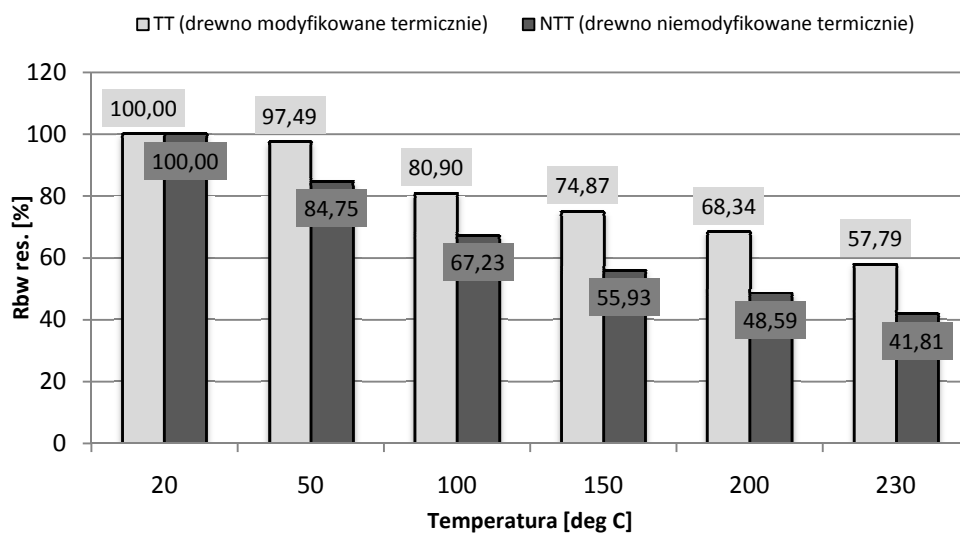
TT – drewno modyfikowane termicznie

NTT – drewno nie poddane modyfikacji termicznej

Graficzne miary zmienności rozkładu statystycznego wyników pomiarów wytrzymałości na ściskanie w kolejnych przedziałach temperatury, ich poziomy i rozrzut statystyczny przedstawiono na wykresie ramkowym (rys. 4). Wykres spadku wytrzymałości resztkowej w warunkach podwyższonych temperatur przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Wykres ramkowy wyników badań wytrzymałości na zginanie



Rys.5. Resztkowa wytrzymałości na zginanie

Ze względu na rozrzut uzyskanych wyników przeprowadzono test „post hoc” umożliwiający ocenę różnic między wynikami z kolejnych zakresów obciążenia.

Wykorzystano test Scheffe, który jest oparty na analizie kontrastów w badanych grupach, zapewnia on łączny poziom istotności ($\alpha = 0,05$) dla wszystkich porównań. Test ten charakteryzuje się również małym błędem pierwszego rodzaju polegającym na odrzuceniu hipotezy zerowej zakładającej, że obserwowane różnice w wytrzymałości są przypadkowe, która w rzeczywistości jest prawdziwa. Wyniki testu Scheffe przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki testu Scheffe

Grupy	{1} - M=1,9929	{2} - M=1,9429	{3} - M=1,6143	{4} - M=1,4929	{5} - M=1,3571	{6} - M=1,1500	{7} - M=1,7714	{8} - M=1,5000	{9} - M=1,1929	{10} - M=1,9857	{11} - M=1,8571	{12} - M=1,7357
20TT {1}		1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,111					
50TT {2}	1		0,000	0,000	0,000	0,000		0,000				
100TT {3}	0,000	0,000		0,905	0,024	0,000			0,000			
150TT {4}	0,000	0,000	0,905		0,815	0,000				0,000		
200TT {5}	0,000	0,000	0,024	0,815		0,183					0,000	
230TT {6}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,183							0,000
20NTT {7}	0,111							0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
50NTT {8}		0,000					0,012		0,002	0,000	0,000	0,000
100NTT {9}			0,000				0,000	0,002		0,183	0,000	0,000
150NTT {10}				0,000			0,000	0,000	0,183		0,865	0,034
200NTT {11}					0,000		0,000	0,000	0,000	0,865		0,905
230NTT {12}						0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,905	

TT – drewno modyfikowane termicznie

NTT – drewno nie poddane modyfikacji termicznej

3. PODSUMOWANIE

W prezentowanych tu badaniach dokonano oceny wpływu temperatur pożarowych na wytrzymałość na zginanie drewna świerkowego, wykorzystywanego w konstrukcjach inżynierskich. Oceniano również wpływ modyfikacji termicznej poprzedzającej ekspozycję w podwyższonych temperaturach symulujących temperatury pożaru. Wpływ temperatur pożarowych na spadek wytrzymałości jest jednoznaczny. W przypadku drewna świerkowego poddanego modyfikacji termicznej (TT) spadek resztkowej wytrzymałości na zginanie w temperaturze 230°C wyniósł 42,21%, natomiast w przypadku drewna nie poddanego modyfikacji termicznej (NTT) spadek resztkowej wytrzymałości na zginanie był większy, w temperaturze 230°C resztkowa wytrzymałość była mniejsza od uzyskiwanej w temperaturze 20°C o 58,19%. Wytrzymałość początkowa drewna TT określona w temperaturze 20°C była również wyższa od wytrzymałości drewna NTT. Dodatkowo odchylenia standardowe wyników pomiarów wytrzymałości drewna TT są znacząco mniejsze od odchylenia wyników wytrzymałości drewna NTT. Powyższe zależności kontastują najczęściej publikowane informacje dotyczące wpływu modyfikacji termicznej drewna, np. w publikacji [11] stwierdzono, że wpływ modyfikacji termicznej prowadzonej w temperaturach powyżej 150°C (w prezentowanych w niniejszej publikacji badaniach temperatura ta wynosiła 160°C) powoduje spadek wytrzymałości na zginanie i rozciąganie o 10-30% w stosunku do materiału nie poddanego modyfikacji termicznej. Ponadto w tej samej publikacji podkreśla się, że modyfikacja termiczna w takich warunkach powoduje

wzrost kruchości drewna. W wynikach badań wytrzymałości na zginanie objawia się to często wzrostem wartości odchylenia standardowego wyników badań, zależność ta w prezentowanych w publikacji badaniach nie wystąpiła (tab.1). Obserwowany jest jedynie wzrost odchyleń powodowany ekspozycją w coraz wyższych temperaturach, jednakże i w tym przypadku uzyskane wartości są korzystniejsze dla drewna poddanego modyfikacji termicznej.

Różnice pomiędzy wytrzymałością 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. Wewnątrz grup określanych rodzajem drewna (TT lub NTT), nie dla wszystkich zakresów temperaturowych wykazano istotne statystycznie różnice, w stosunku do wyników z zakresów kolejnego bądź poprzedzającego. Zależność ta objawia się szczególnie w dwóch ostatnich zakresach temperatury (200 i 230°C), brak istotnych statystycznie różnic jest najprawdopodobniej spowodowany zawężeniem przedziału do 30°C, co wynika z temperatury zapłonu drewna.

Badania potwierdziły przydatność zaprojektowanego i skonstruowanego w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie specjalnego stanowiska do badań wytrzymałości drewna i materiałów drewnopochodnych w warunkach jednoczesnej ekspozycji w wysokiej temperaturze.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Younsi R., Kocaefe D., Poncsak S., Kocaefe Y.: *Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on ThermoWood technology*, International Communications in Heat and Mass Transfer 37 (2010) 21–28.
- [2] Manríquez M.J., Moraes P.D.: *Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá*, Construction and Building Materials 24 (2010) 99–104.
- [3] Mazela B., Zakrzewski R., Grzeškowiak W., Cofta G., Bartkowiak M.: *Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes*, Wood Technology 7 (2004) 253–262.
- [4] Kartal S.N., Hwang W.J., Imamura Y.: *Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood*, Journal of Materials Processing Technology 198 (2008) 234–240.
- [5] Obataya E., Tanaka F., Norimoto M., Tomita B.: *Hygroscopicity of heat-treated wood 1. Effects of after-treatments on the hygroscopicity of heat-treated wood*, Journal of Wood Science 46 (2000) 77–87.
- [6] Gunduz G., Aydemir D., Karakas G.: *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 (2009) 4391–4395.
- [7] Korkut S., Akgul M., Dundar T.: *The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (Pinus sylvestris L.) wood*, Bioresource Technology 99 (2008) 1861–1868.
- [8] Fengel D., Wegener G.: *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*, Berlin, Walter de Gruyter 1989.

-
- [9] Beall F.C., Eickner H.W.: *Thermal degradation of wood components*, Forest Products Research Paper, FPL 130, 1970.
- [10] Kamdem D.P., Pizzi, A., Jermannaud, A.: *Durability of heat-treated wood*. Holz als Roh-und Werkstoff 60 (2002) 1–6.
- [11] Jamsa S., Viitaniemi P.: *Heat treatment of wood. Better durability without chemicals*. In: *Review on Heat treatment of wood*. Rapp AO (ed) Proceedings of Special Seminar in Antibes, France 2001.