

Dr inż. Daniel Pieniak, Dr inż. Paweł Ogrodnik, Mgr inż. Marcin Oszust

Szkoła Główna Służby Pożarniczej
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
ul. Słowackiego 52-54, 01-629 Warszawa, Polska
Tel: (022) 5617544
E-mail: mechanika@sgsp.edu.pl

Prof. Dr hab. inż. Andrzej Niewczas

Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji
Wydział Transportu i Informatyki
ul. Mełgiewska 7-9, 20-209 Lublin, Polska
E-mail: andrzej.niewczas@wsei.lublin.pl

Niezawodność konstrukcyjna drewna modyfikowanego termicznie i materiałów drewnopochodnych w podwyższonych temperaturach

Słowa kluczowe: *Temperatury pożarowe, drewno klejone warstwowo (GL), drewno fornirowane warstwowe (LVL), drewno modyfikowane termicznie (TT), niezawodność, wytrzymałość na zginanie.*

Streszczenie: Dotychczasowe materiały drewniane i drewnopochodne miały wiele wad ograniczających ich zastosowanie, co prowadziło do zastępowania ich innymi. Największy problem stanowiły ograniczenia, co do maksymalnych wymiarów przekroju elementów oraz możliwości wykonywania elementów o znacznych rozpiętościach, również trwałość powierzchni a także łatwopalność ograniczały zastosowanie. Obecnie w konstrukcjach inżynierskich coraz częściej wykorzystuje się drewno modyfikowane termicznie oraz materiały drewnopochodne m.in. drewno klejone warstwowo (GL), drewno fornirowane warstwowe (LVL) oraz drewno modyfikowane termicznie (TT). Drewno jest materiałem ulegającym termicznej degradacji. W warunkach oddziaływania wysokich temperatur konstrukcja drewniana jest poddana jednoczesnym wymuszeniom w formie sił oraz oddziaływaniom termicznym. Oddziaływanie tych dwóch czynników wpływa na rozkład naprężeń w strukturze drewna oraz ogranicza nośność konstrukcji, powodując dekohezję struktury. Celem prezentowanych badań było określenie wpływu podwyższonych temperatur na wytrzymałość materiałów drewnianych i drewnopochodnych. Ponadto, na podstawie wyników badań wytrzymałości przeprowadzono analizę prawdopodobieństwa przetrwania w podwyższonych temperaturach. Próbkę do badań wytrzymałości na zginanie statyczne zostały wykonane z drewna fornirowego warstwowego – LVL, drewna sosny pospolitej klejonego warstwowo – GL oraz drewna świerkowego poddanego – TT i niepoddanego modyfikacji termicznej – NTT, w formie prostopadłościanów o wymiarach 20x20x300mm. Oceny wytrzymałości na zginanie dokonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FPZ 100/1 (VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein, Germany). Temperatury środowiska pożaru symulowano za pomocą nawiewu gorącego powietrza (GHG 650 LCE). Oceny dokonywano w zakresach temperatur: 20, 50, 100, 150, 200, 230°C. Uzyskane wyniki posłużyły ocenie niezawodności. W analizie wykorzystano dwuparametrowy rozkład Weibull'a.

1. Wstęp

Drewno, jako jeden z najstarszych obok kamienia i ziemi materiałów budowlanych używanych przez człowieka nadal jest jednym z podstawowych surowców stosowanych w konstrukcjach inżynierskich. Rosnące wymagania odnośnie konstrukcji niosą za sobą

konieczność poprawiania cech mechaniczno-użytkowych materiałów drewnianych. Bez wątplenia nowe technologie wytwarzania drewnianych i drewnopochodnych elementów konstrukcyjnych oraz nowe typy połączeń przyczyniają się do rozwoju konstrukcji z tych materiałów. 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 występujące w procesie pożaru powodują dekohezję struktury. Zauważalna redukcja wytrzymałości drewna następuje już w temperaturach większych od 65°C [40]. Na poziomie mikrostrukturalnym drewno jest niehomogenicznym kompozytem komórkowym, kompozycją celulozy, hemicelulozy, ligniny i innych mniej znaczących składników [44]. Celuloza stanowi największą część objętości drewna. Składa się ona z długich łańcuchów węglowych, które są najistotniejsze dla wytrzymałości drewna. Hemiceluloza składająca się z rozgałęzionych polimerów amorficznych, wypełnia obszar pomiędzy celulozą i ligniną w strukturze drewna. Lignina jest polimerem amorficznym odpowiedzialnym za kohezję struktury drewna, jest ona czynnikiem „spajającym” jego strukturę [20]. 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 spistości struktury drewna następuje w zakresie temperatur pomiędzy 220 a 250°C [3, 17], natomiast dehydratacja ligniny następuje w temperaturze 200°C. Drewno konstrukcyjne posiada korzystne właściwości fizyczne i technologiczne, wysoką wytrzymałość oraz niską gęstość. Dotychczas, wadą były ograniczenia, co do maksymalnych wymiarów przekrojów elementów oraz możliwości wykonywania elementów o znacznych rozpiętościach. Obecnie, technologia obróbki drewna, rozwój możliwości modyfikacji, kształtowania tego typu materiałów oraz ich walory estetyczne sprzyjają powstawaniu konstrukcji tego typu. Stosowanie środków chroniących przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi konstrukcji drewnianych jest nieustannie rozwijane, co powoduje coraz większy zakres obszaru stosowalności materiałów drewnianych [8]. Szczególnie ważne okazało się wykorzystanie wodoodpornych klejów na bazie żywic syntetycznych wraz z zastosowaniem prostego sposobu łączenia wzdłużnego za pomocą złączy klinowych, co umożliwiło znacznie szybszy sposób budowania z wykorzystaniem klejonych elementów konstrukcyjnych o wymiarach większych niż naturalny produkt wyjściowy [25]. Łączenia elementów drewnianych poprzez złącza prętami stalowymi także dają większe możliwości w projektowaniu konstrukcji drewnianych oraz umożliwiają ich miejscową renowację z zachowaniem całościowej struktury konstrukcji [11]. Ze względu na potrzebę uzyskania wysokiej estetyki wewnątrz konstrukcje drewniane i drewnopochodne o dużych rozpiętościach stosowane są w budownictwie użyteczności publicznej. W obiektach o zawartości wysokiej wilgotności w pomieszczeniach (hale basenowe) drewno okazuje się bardzo korzystnym materiałem konstrukcyjnym. Do najciekawszych konstrukcji wielkowymiarowych opartych na materiałach drewnianych można zaliczyć halę widowiskowo-sportową w Hamar „The Viking Ship” o długości 260m, maksymalnej szerokości 96m i maksymalnej wysokości 35m [38], czy też kładkę dla pieszych w Sromowcach Niżnych, której długość całkowita wraz z rampami gruntowymi i szerokość wynoszą odpowiednio 149,95m i 3,5m [5].

Coraz większym zainteresowaniem, w aspekcie zarówno parametrów wytrzymałościowych jak i pożarowych cieszą się również nowe gatunki, do tej pory niewykorzystywane w Europie. Drewno z krajów tropikalnych jest alternatywą dla krajowych gatunków i z pewnością będzie następował dalszy rozwój tego typu materiałów [26]. W celu realizacji wymagań przyjętych w nowoczesnym budownictwie, z których najważniejsze to swoboda w realizacji koncepcji architektonicznych, duża odporność ogniowa, konieczność

uzyskiwania dużych rozpiętości konstrukcji, brak konieczności konserwacji, ograniczenie kosztów, odporność na czynniki chemiczne najczęstszymi materiałami stosowanymi w są : drewno klejone (GL) i drewno fornirowane warstwowe (LVL) oraz drewno modyfikowane termicznie (TT). Należy jednak zaznaczyć, że materiały te często pełnią odmienne funkcje w konstrukcjach.

Drewno klejone warstwowo (GL) stosowane jest do budowy domów jednorodzinnych i wielorodzinnych oraz obiektów wielkogabarytowych typu hale produkcyjne, handlowe, sportowe, baseny, czy też kładek i mostów. Najczęściej stosowanym gatunkiem drewna w Polsce do produkcji elementów klejonych jest sosna oraz świerk, rzadziej modrzew. Podstawowym klejem stosowanym do produkcji tego typu drewna jest klej melaminowy, który jest odporny na działanie wody i ognia. Alternatywnym rozwiązaniem jest klej rezorcynowy, który jest szczególnie odporny na działanie wilgoci. Obydwa rodzaje klejów nie wydzielają żadnych szkodliwych substancji nawet podczas pożaru [30]. Wyniki badań wykazały, że zachowanie się elementów z drewna klejonego warstwowo (GL) w warunkach podwyższonych temperatur silnie uzależnione jest od zachowania się kleju, sklejącego poszczególne warstwy elementu [13]. Natomiast badania porównawcze kilku różnych gatunków drewna przeprowadzane na kalorymetrze stożkowym, oznaczającym szybkość wydzielania się ciepła wykazały, że szybkość zwęglania próbek drewna klejonego maleje wraz ze wzrostem jego gęstości [42]. W zależności od wytrzymałości charakterystycznej na zginanie drewno klejone zostało podzielone na 5 klas: od GL24 do GL40. Sortowanie (gradacja) tarcicy zgodnie z wymaganiami normowymi odbywa się wizualnie (dla klas GL24 oraz GL28) oraz mechanicznie dla klas wyższych (GL32 oraz GL36). Taki sposób sortowania powoduje, że najbardziej dostępnymi klasami jest GL24 oraz GL28. Drewno klejone warstwowo, po zapewnieniu odpowiednich warunków takich jak sfazowane krawędzie oraz strugana powierzchnia, jest materiałem odpornym na działanie ognia. Zgodnie z wytycznymi Instytutu Techniki Budowlanej elementy tego typu przy szerokości poniżej 12 cm, klasyfikuje się, jako SRO (słabo rozprzestrzeniające ogień). Przy szerokości przekraczającej 12 cm lub poniżej 12 cm przy dodatkowej impregnacji środkiem ogniochronnym, jako elementy NRO (nierozprzestrzeniające ognia). Odporność ogniową w zakresie od R15 do R60 w drewnie klejonym uzyskuje się na etapie projektowania poprzez odpowiednią analizę statyczną oraz dobór przekrojów.

Drewno fornirowane warstwowe (LVL - Laminated Veneer Lumber) obecnie jest wykorzystywane na wiele sposobów, poczynając od belek stropowych, w mostownictwie a kończąc na elementach okiennych i drzwiowych [28]. Dzięki konstrukcji warstwowej, elementy konstrukcyjne oparte na LVL charakteryzują się dużą sztywnością, dobrą odpornością ogniową oraz estetycznym wyglądem. Elementy tego typu dzięki jednorodności posiadają znakomitą stabilność wymiarów, a obecnie są dostępne w szerokim zakresie wymiarowym [29]. Żywice adhezyjne łączące warstwy drewna, istotnie wpływają na jego właściwości, zmniejszając adsorbcję wilgoci, ograniczając wpływ środowiska kwaśnego, wpływają także na mniejszą masę własną [15]. Do wykonania fornirów klejonych stosuje się najczęściej kleje fenolowo-formoaldehydowe, natomiast do łączenia fornirów zewnętrznych mogą być także stosowane kleje melaminowe [39]. W materiałach LVL stosuje się warstwy forniru o grubości ok. 3-4mm (najczęściej 3.2mm), który jest skrawany obwodowo [8]. Parametry fizyko-mechaniczne materiału LVL zależne są w dużym stopniu od gatunku drzew, z którego wykonuje się materiał, typu kleju oraz od grubości poszczególnych warstw [1, 16]. Warstwy fornirów w jednym elemencie konstrukcyjnym mogą być wykonywane z niejednakowych gatunków drewna. Badano i stwierdzono wpływ kolejności ułożenia poszczególnych warstw fornirów wykonanych z różnych gatunków drewna na wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości [7]. Jakość drewna wykorzystywanego do produkcji oraz gatunek forniru mają także duże znaczenie [37]. W dosyć dawno przeprowadzonych

badaniach wytrzymałości materiałów LVL [36], wykazano o kilka procent wyższą wytrzymałość materiału LVL wykonanego z forniru pierwszo gatunkowego w porównaniu do drugo i trzecio gatunkowego. Istotne znaczenie dla wytrzymałości ma również ilość sęków i ich rozmieszczenie w strukturze materiału [41] oraz zgodność kierunku włókien z kierunkiem wektora wymuszenia [33].

Modyfikowanie termiczne drewna jest jedną z nowych technologii mających na celu poprawę jego właściwości. Drewno modyfikowane termicznie (TT-thermal treatment) jest coraz szerzej wykorzystywane także w Polsce. Większość dostępnego na rynku drewna modyfikowanego termicznie to gatunki egzotyczne. Modyfikowane termicznie gatunki drewna krajowego w tym świerkowego mogą stanowić alternatywę a w dłuższej perspektywie zastąpić gatunki egzotyczne. Modyfikacja struktury drewna wpływa na poprawę jego niektórych właściwości fizyko-mechanicznych, głównie twardości i odporności na ścieranie [21], ma wpływ na poprawę stabilności wymiarowej elementów drewnianych, odporność biologiczną drewna oraz zmniejszenie poziomu pochłanianej przez drewno wilgoci [18, 27]. Poprawa tej właściwości następuje w wyniku zmian składu chemicznego drewna, głównie w wyniku degradacji hemicelulozy [14]. 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 [19]. Zabieg termicznej modyfikacji drewna następuje zazwyczaj w zakresie temperatur od 160 do 280°C [12], a 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 doraźnej drewna.

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych, uzyskano wyniki, które posłużyły wykonaniu analizy niezawodności wyżej wymienionych materiałów drewnopochodnych oraz drewna modyfikowanego termicznie w wysokich temperaturach. W przypadku konstrukcji statycznych możliwa jest ocena niezawodności na podstawie prawdopodobieństwa nie przekraczania stanu granicznego nośności lub zniszczenia konstrukcji [24]. Prawdopodobieństwo zniszczenia bądź inaczej nieprzetrwania może być określone na podstawie rozkładu zmiennej losowej wytrzymałości materiału oraz rozkładu tej zmiennej w funkcji temperatury otoczenia, w którym obiekt się znajduje. Przyjęcie powyższego sprowadza niezawodność konstrukcji do niezawodności wytrzymałości jej elementów składowych. Pojęcie niezawodności wytrzymałościowej określa w sposób równie syntetyczny, co trafny, zarówno istotę wszelkich badań czy dociekań wytrzymałościowych jak i ich cel ostateczny [2]. W tym przypadku zawodność jest równoznaczna z prawdopodobieństwem nieprzetrwania obiektu inżynierskiego bądź jego elementu, a niezawodność jest prawdopodobieństwem przetrwania. Bardzo istotną kwestią w analizie niezawodności konstrukcji jest poziom analizy niezawodnościowej. Analiza może być prowadzona w zakresie deterministycznych ocen statyczno-wytrzymałościowych oraz probabilistycznej oceny bezpieczeństwa konstrukcji. Wyróżnia się trzy poziomy analizy: na poziomie punktu - ściślej cząstki materiału konstrukcyjnego, na poziomie sekcji - tzn. przekroju elementu konstrukcji, na poziomie obiektu - czyli układu konstrukcyjnego budowli. W prezentowanym artykule dokonano analizy na poziomie pierwszym w oparciu o wyniki badań wytrzymałości doraźnej w wysokich temperaturach.

2. Materiał i metoda

2.1. Badany materiał

Próbki do badań wytrzymałości na zginanie statyczne zostały wykonane w formie prostopadłościanów o wymiarach 20x20x300 mm zgodnie z PN-72/C-04907 [45]. W badaniach zostały wykorzystane cztery rodzaje próbek: drewno klejone (GL), drewno fornirowane warstwowe (LVL) oraz próbki wykonane z tarcicy świerkowej modyfikowanej (TT) i niemodyfikowanej (NTT) termicznie. Do wykonania próbek z drewna klejonego (GL) użyto kleju melaminowego oraz tarcicy sosnowej, próbki wytworzono poprzez połączenie dwóch elementów o identycznych wymiarach celem uzyskania wymiaru normowego opisanego powyżej, wytrzymałość doraźnej badanego materiału była na poziomie klasy GL28. Próbki materiału LVL były wykonane z siedmiu warstw fornirów świerkowych o jednakowej grubości i tym samym kierunku włókien. Kierunek włókien we wszystkich badanych materiałach był zgodny osią długą próbek.

Przed przystąpieniem do badań próbki leżakowały w temperaturze 20°C przez okres 6 miesięcy, po tym czasie uzyskano wilgotność na poziomie około 8%.

Modyfikacja termiczna próbek sosnowych (TT) odbyła się w trzech etapach zgodnie z ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Pierwszy etap polegał na umieszczeniu próbek w suszarce i nagraniu ich do temperatury 100°C w czasie 30 minut. Następnie stopniowo podnoszono temperaturę do 120°C, przez 60 min. W tym czasie następował proces suszenia drewna, a jego wilgotność spada do około zera.

Rys. 1. Proces modyfikacji termicznej drewna [opracowanie własne]

Etap drugi polegał na intensywnym nagrzewaniu. 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. W trzecim etapie dokonano chłodzenia i klimatyzacji. W tym etapie obniżono temperaturę w suszarce do 80-90°C, czas trwania etapu wynosił 60 min. W tej fazie następowało stopniowe wychładzanie próbek. Po tej operacji próbki były pakowane w folię aluminiową.

Z tej samej tarcicy świerkowej, z której wykonano próbki poddane modyfikacji (TT) zostały również wykonane próbki niemodyfikowane termicznie (NTT).

Badanie przeprowadzono na populacji 204 próbek (66 - LVL, 54 – GL, 42 – NTT i 42 – TT), w równych ilościach w każdej z grup określonych poziomem temperatury.

2.2. Badanie wytrzymałości

Próbkę wytrzymałościową prowadzono metodą zginania trójpunktowego. Badania wytrzymałościowe 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 tawersy. W czasie badań użyty został zakres prędkości przesuwu tawersy I/III, który pozwala na przesuw tawersy z prędkością 0,021÷0,84 mm/min. Prędkość tawersy ustalono za pomocą potencjometru w środku zakresu prędkości przesuwu.

Do obliczenia wytrzymałości na zginanie wykorzystano równanie:

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

gdzie:

P_{max} – siła niszcząca próbkę [N]

l – długość próbki [mm]
 b – szerokość próbki [mm]
 h – wysokość próbki [mm]

Badania wytrzymałościowe realizowano w podwyższonych temperaturach, aż do zniszczenia próbki.

2.3. 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 typu K, celem 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. Dodatkowo badania przeprowadzone dla następujących zakresów temperatury: 50°C, 100°C, 150°C oraz 200°C.

W badaniach podstawowych prowadzono pomiary temperatur na powierzchni próbki za pomocą dwóch termopar rozmieszczonych stycznie do powierzchni bocznych próbki. 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.

2.4. Analiza niezawodności

Analiza niezawodności została przeprowadzona w oparciu o wyniki uzyskane w próbie wytrzymałościowej. Analizowano niezawodność w warunkach działania podwyższonych temperatur w oparciu o model Weibulla. Dokonano analizy wykorzystując wszystkie uzyskane wyniki wytrzymałości z kolejnych zakresów temperatury.

W analizie wykorzystano dwuparametrowy rozkład Weibulla. Dystrybuanta rozkładu Weibulla (z dodatnimi parametrami σ_0 , c , i σ_u), jest opisana zależnością [22]:

$$P_f = 1 - \exp \left[-V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^c \right] \quad (2)$$

gdzie:

σ – obciążenie niszczące,
 σ_0 – parametr skali,
 c – parametr kształtu,
 σ_u – parametr położenia,
 e – stała ($e = 2.71828...$),
 V – objętość próby.

W analizowanym przypadku P_f jest prawdopodobieństwem zniszczenia próbki z drewna bądź z materiału drewnopochodnego. Wartość tego prawdopodobieństwa określona jest w zbiorze liczb od 0 do 1.

W przypadku, gdy znamy wartość obciążenia, przy którym prawdopodobieństwo zniszczenia jest równe zero (w prezentowanej analizie jest to największa znana wartość obciążenia niszczącego w temperaturze 20°C), prawdopodobieństwo to można obliczyć z poniższej zależności:

$$P_f = \left(\frac{n}{N^* + 1} \right) \quad (3)$$

gdzie:

N^* - całkowita liczba próbek,

n - rangowany zbiór próbek.

W przypadku, gdy licznosc – objętość próby V jest stała we wszystkich podgrupach populacji wyznaczonych kolejnymi zakresami temperatury, można ją pominąć w obliczeniach [10, 35].

Przyjęcie parametru położenia $\sigma_u = 0$ sprowadza rozkład Weibulla do dwuparametrowego. Założenie powyższe sprowadza zakres prawdopodobieństwa zniszczenia do początku w miejscu znanej wcześniej wspomnianej największej wartości obciążenia niszczącego. Przy tych założeniach równanie przyjmie następującą postać:

$$1 - P_f = 1 - \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^c \right] \right) \quad (4)$$

Powyższe równanie może być uproszczone, przy użyciu logarytmowania do postaci

$y = ax + b$ przez:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = c \ln(\sigma) - c \ln(\sigma_0) \quad (5)$$

gdzie:

P_s – prawdopodobieństwo przeżycia (równe $1 - P_f$).

Przecięcie osi Y jest zależne od $-c \ln(\sigma_0)$, nachylenie krzywej jest parametrem kształtu rozkładu Weibulla c . Licznosc próby badawczej wpływa na wartość współczynnika determinacji R^2 , który decyduje o jakości predykcji parametrów rozkładu Weibull'a [31]. Oznacza to, że im on jest wyższy tym wyższa jakość doboru parametru kształtu rozkładu (wartości R^2 przedstawiono na rysunku 2).

3. Wyniki badań

Parametry statystyczne wyników badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 1. Logarytmiczny rozkład prawdopodobieństwa niezniszczenia próbek drewna badanych w podwyższonych temperaturach przedstawiono na rysunku 2.

Tab. 1. Statystyki opisowe wyników badań wytrzymałości na zginanie

Rys. 2. Rozkład logarytmiczny prawdopodobieństwa zniszczenia w funkcji wytrzymałości na zginanie próbki w polu wysokich temperatur

4. Analiza i dyskusja wyników badań

W badaniach wytrzymałości drewna wskazuje się, że wilgotność i temperatura eksploatacji drewna konstrukcyjnego mają znaczący wpływ na wytrzymałość mechaniczną drewna [23, 43]. Spadek wilgotności drewna sprzyja poprawie własności mechanicznych, natomiast wzrost temperatury powoduje pogorszenie tych własności. Wyniki prezentowanych badań wykazały, że wpływ podwyższonych temperatur na spadek wytrzymałości jest jednoznaczny. W przypadku drewna świerkowego poddanego modyfikacji termicznej (TT) spadek wytrzymałości na zginanie w temperaturze 230°C wynosił 42,21%, natomiast w przypadku drewna nie poddanego modyfikacji termicznej (NTT) 58,46% w odniesieniu do uzyskanej w temperaturze 20°C. Materiały drewnopochodne LVL i GL w temperaturze 230°C zachowały odpowiednio 33,32% i 28,57% wytrzymałości uzyskanej w temperaturze 20 °C. Podobny poziom wartości resztkowej w temperaturze 230°C uzyskano w badaniach przedstawionych w publikacji [20], z tym, że w warunkach obciążeń ściskających działających równolegle do włókien, co może wskazywać na podobieństwo procesu degradacji tej własności.

W przypadku materiału naturalnego obserwowano mniejszą wytrzymałość drewna NTT we wszystkich zakresach temperatury, jednakże wytrzymałości na zginanie drewna TT i NTT w temperaturze normalnej (20°C) były zbliżone, co może oznaczać, że wstępna modyfikacja termiczna drewna sprzyja niezawodności wytrzymałości. Zmniejszenie wilgotności w technologicznym procesie modyfikacji termicznej drewna powoduje skrócenie wiązań wodorowych polimeru, jakim jest celuloza [20]. Polimer ten odpowiada w najwyższym stopniu za wytrzymałość mechaniczną drewna, a skrócenie wiązań wpływa na poprawę tej własności [4, 34]. Wg Schaffer'a [32], wpływ na wytrzymałość ma również lignina stanowiąca otulinę włókien drewna, której struktur może zacząć się zmieniać w temperaturze 55°C.

Wraz ze wzrostem temperatury obserwuje się wzrost wartości współczynnika zmienności wyników wytrzymałości na zginanie, w przypadku materiałów LVL i GL wzrost ten był większy. Jest to niekorzystne, ponieważ znacząco ogranicza możliwość precyzyjnej oceny stanu konstrukcji oraz predykcji poziomu zagrożenia w momencie, gdy temperatury elementów konstrukcji są niższe od temperatury ich zapłonu.

Intensywność degradacji wytrzymałości badanych materiałów była najwyższa w pierwszych dwóch przedziałach temperatury (tab.1) dla materiałów: NTT, LVL i GL. Inną zależność wykazano tylko w przypadku materiału TT, dla którego spadek wytrzymałości w pierwszym przedziale był nieznaczny. Jest to prawdopodobnie spowodowane modyfikacją termiczną drewna, która powoduje przemiany celulozy i zeszklenie hemicelulozy. Ponadto, wskazuje się, że przemiana struktury celulozy podczas modyfikacji termicznej w odpowiednich warunkach, wpływa na poprawę sztywności i innych własności fizyko-mechanicznych drewna, co również mogło mieć wpływ [4].

Prezentowana metoda analizy niezawodności materiału nie jest wystarczająca do oceny niezawodności konstrukcji jako całości. Można jedynie, w pewnym zakresie, odnosić prezentowaną metodę do pierwszego poziomu analizy niezawodności konstrukcji, odnoszącego się do jednego z elementów konstrukcji. Oznacza to, że prezentowana analiza oparta na prostej próbie wytrzymałościowej trójpunktowego zginania, nie uwzględnia redystrybucji sił do innych elementów konstrukcji i sposobów realizacji obciążenia. W przypadku całych sekcji konstrukcji, które zazwyczaj są szeregowymi zbiorami elementów, w analizie niezawodności, ocenie często poddaje się tzw. najslabsze ogniwo. A niezawodność

całej sekcji będącej układem szeregowym jest w najprostszym ujęciu iloczynem niezawodności elementów składowych [24]. Model szeregowy może być zastosowany również do oceny bezpieczeństwa i niezawodności elementów konstrukcji statycznie niewyznaczalnych, jeśli nie dopuszcza się redystrybucji sił wewnętrznych i zachowuje statyczny sposób obliczeń, tzn. oblicza się naprężenia w różnych krytycznych przekrojach konstrukcji i porównuje z wytrzymałością materiału [24].

Ograniczeniem prezentowanej analizy jest również wnioskowanie jedynie na podstawie wytrzymałości doraźnej próbek bez historii obciążenia, a jak wiadomo wytrzymałość długotrwała drewna jest znacznie niższa niż doraźna. Według [6] po 10 latach eksploatacji wynosi ona około 60% wytrzymałości doraźnej, a po 50 latach około 50%.

5. Wnioski

Celem prezentowanych badań było określenie wpływu podwyższonych temperatur na wytrzymałość materiałów drewnianych i drewnopochodnych. Ponadto, na podstawie wyników badań wytrzymałości przeprowadzono analizę prawdopodobieństwa przetrwania w podwyższonych temperaturach (20°C - 230°C). W badaniach wykorzystano 204 próbki (66 - LVL, 54 - GL, 42 - NTT i 42 - TT), w równych ilościach w każdej z grup określonych poziomem temperatury. W teście realizowano jednocześnie obciążenie mechaniczne quasi statyczne oraz obróbkę termiczną. Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Oddziaływanie podwyższonej temperatury spowodowało znaczący spadek wytrzymałości reszkowych badanych materiałów. Najwyższą wytrzymałość reszkową uzyskano dla drewna modyfikowanego termicznie (TT), co może oznaczać, że wstępna obróbka termiczna sprzyja zachowaniu wytrzymałości w podwyższonych temperaturach.
- W przypadku drewna litego niemodyfikowanego (NTT) i modyfikowanego (TT) termicznie wykazano wyższą wytrzymałość reszkową niż dla obydwu badanych wyrobów drewnopochodnych (LVL i GL). Co może świadczyć, że klejona warstwowa struktura wpływa niekorzystnie na zachowanie tego typu materiałów w warunkach pożaru.
- Obserwowano wzrost odchylenia standardowego wyników wytrzymałości na zginanie materiałów LVL i GL w kolejnych zakresach temperatur. Co może oznaczać, że najwyższy wzrost nieprzewidywalności wytrzymałości tych materiałów następuje w temperaturach zbliżonych do temperatury zapłonu drewna. Inaczej przebiegało to w przypadku drewna litego niemodyfikowanego termicznie, wykazano najwyższy skok odchylenia standardowego wytrzymałości w temperaturze 150°C – w tej temperaturze intensywnie postępuje proces degradacji hemicelulozy.
- Na podstawie logarytmicznego rozkładu prawdopodobieństwa zniszczenia w polu temperatury, uzyskano wyższe wartości parametru kształtu c rozkładu Weibulla w przypadku drewna świerkowego TT (najwyższa wartość $c = 5,58$) i NTT ($c = 3,31$). Niższa wartość parametru skali rozkładu Weibulla wskazuje na zawodność wytrzymałości. Przyczyny niższych wartości parametrów kształtu uzyskanych dla drewna LVL ($c = 2,88$) i GL ($c = 2,43$) należy najprawdopodobniej upatrywać w klejonej warstwowej strukturze badanych materiałów, która nie wpływa korzystnie na zachowanie się w warunkach pożaru.
- Przeprowadzone badania wskazują, że w przypadku grup testowych materiałów nie poddanych modyfikacji termicznej występują małe wartości współczynnika determinacji (poniżej 0,95). Może to być spowodowane nieliniowym spadkiem własności materiału w warunkach podwyższonych temperatur i zwiększa nieprzewidywalność zachowania się.

Literatura

1. Baldwin R.F. Plywood and veneer-based products, manufacturing practices (Wood technology books ser). Miller Freeman. San Francisco 1995.
2. Bąk R, Burczyński T. Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. Wyd. WNT. Warszawa 2001.
3. Beall F.C, Eickner H.W. Thermal degradation of wood components. Forest Products Research Paper 1970: 130.
4. Bhuiyan RT, Hirai N, Sobue N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. Wood Sci Technol 2000;46:431–6.
5. Biliszczyk J, Hawryszków P, Maury A, Sułkowski M, Węgrzyniak M. Kładka dla pieszych w Sromowcach Niżnych. Rekordowa konstrukcja mostowa z drewna klejonego. Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie 2007; 11: 36-39.
6. Bliszczyk J, Bień J, Maliszewski P. Mosty z drewna klejonego. WKŁ Warszawa 1988.
7. Burdurlu E, Kilic M, Ilce A, Uzunkavak O. The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.). Construction and Building Materials 2007; 21: 1720-1725.
8. Caggins C.R. Timber preservation in building and construction. Construction and Building Materials 1989: 114-117.
9. Chui Y, Schneider M, Hang H. Effects of resin impregnation and process parameter on some properties of poplar LVL. Forest products Journal 1994; 44: 74-78.
10. Davies D.G.S. The statistical approach to engineering design in ceramics. Proceedings of the British Ceramic Society 1973; 22: 429-452.
11. D Otero Chans, Estevez Cimadevila J, Martin Gutierrez E. Glued joints in hardwood timber. International Journal of Adhesion & Adhesives 2008; 28: 457-463.
12. Fengel D, Wegener G. Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, Walter de Gruyter 1989.
13. Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jobstl R. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. Fire Safety Journal 2009; 44: 1078-1087.
14. 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 2009; 30: 4391-4395.
15. Johansson C.J. Glued-in bolts. Timber engineering. STEP 1: lecture C14. Centrum Hout. Almere 1995.
16. Kamala B.S, Kumar P, Rao R.V, Sharma S.N. Performance test of laminated veneer lumber (LVL) from rubber wood for different physical and mechanical properties. Holz Roh Werkst 1999: 114-116.
17. Kamdem D.P, Pizzi A, Jermannaud A. Durability of heat-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff 2002; 60: 1-6.
18. 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 2008; 198: 234-240.
19. Korkut S, Akgul M, Dundar T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. Bioresource Technology 2008; 99: 1861-1868.
20. Manríquez M.J, Moraes P.D. Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá. Construction and Building Materials 2010; 24: 99-104.
21. Mazela B, Zakrzewski R, Grześkowiak W, Cofa G, Bartkowiak M. Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes. Wood Technology 2004; 7: 253-262

22. Migdalski J. Inżynieria niezawodności. Poradnik. Wyd. ATR ZETOM. Warszawa 1992.
23. Moraes PD et al. Influence of temperature on the embedding strength. *Holz Roh-Werkst* 2005;63:297–302.
24. Murzewski J. Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Wyd. Arkady. Warszawa 1989.
25. Neuhaus H.: Budownictwo drewniane, podręcznik inżyniera. Polskie Wydawnictwo Techniczne. Rzeszów 2006.
26. Njankouo J, Dotreppe J, Franssen J. Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. *Construction and Building Materials* 2005; 19: 376-386.
27. 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* 2000; 46: 77-87.
28. Ozcifci A. Effects of scarf joints on bending strength and modulus of elasticity to laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment* 2007; 42: 1510-1514.
29. Ozcifci A, Okcu O. Impacts of some chemicals on combustion properties of impregnated laminated veneer lumber (LVL). *Journal of materials processing technology* 2008; 199: 1-9.
30. Przepiórka J, Żurowski P. Konstrukcyjne drewno klejone. *Inżynier Budownictwa* 2008; 10: 60-64.
31. Ritter J.E, Bandyopadhyay N, Jakus N. Statistical reproducibility of the dynamic and static fatigue experiments. *Ceramic Bulletin* 1981; 60: 798-806.
32. Schaffer EL. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry douglas fir. *J Test Eval* 1973;1(4):319–29
33. Sei-Chang O. Applying failure criteria to the strength evaluation of 3-ply laminated veneer lumber according to grain direction by uniaxial tension test. *Construction and Building Materials*, 2010.
34. Sivonen H et al. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 2002;56(6):648–53.
35. Stanley P, Fessler H, Sivil A.D. An engineer's approach to the prediction of failure probability in brittle components. *Proceedings of the British Ceramic Society* 1973; 22: 453-487
36. Strickler M.D, Pellerin RF. Tension proof loading laminated beams. *Forest Prod J* 1971; 21: 10-15.
37. Tichy R.J, Bodig G.J. Flexural properties of glued la pine dimension lumber. *Forest Prod J* 1978; 29.
38. Tomusiak A. Drewno klejone warstwowo. *Materiały Budowlane* 2001; 8: 92-93.
39. Uysal B. Bonding strength and dimensional stability of laminated veneer lumbers manufactured by using different adhesives after the steam test. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2005; 25: 395-403.
40. White R.H, Dietsberger M.A. Wood Products: Thermal Degradation and Fire. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier Science Ltd 2001: 9712-9716
41. Wolf R, Moddy R.C. Bending strength of vertically glued laminated beams. *Forest Prod J*. 1979; 30: 32-40.
42. Yang T, Wang S, Tsai M, Lin C. The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. *Building and Environment* 2009; 44: 231-236.

43. Young SA, Clancy P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating simulating fire conditions. *Fire Mater* 2001;25: 83–93.
44. Younsi R, Kocaeffe D, Poncsak S, Kocaeffe Y. Computational and experimental analysis of high temperature thermal treatment of wood based on ThermoWood technology. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2010; 37: 21-28.