

dr inż. **Daniel PIENIAK**

kpt. dr inż. **Paweł OGRODNIK**

mgr inż. **Marcin OSZUST**

bryg. mgr inż. **Lesław DEC**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Mechaniki Stosowanej

NIEZAWODNOŚĆ W WYSOKICH TEMPERATURACH KLEJONEGO WARSTWOWO DREWNA SOSNY POSPOLITEJ W ZAKRESIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ZGINANIE STATYCZNE

Reliability at high temperatures of glued laminated pine timber in the static bending strength

Streszczenie

Drewno klejone ze względu na swoje właściwości, jest coraz częściej wykorzystywane. Technologia ta umożliwia wytworzenie elementów konstrukcyjnych o dużych przekrojach poprzecznych i znacznych rozpiętościach. Drewno klejone warstwowo, po odpowiedniej obróbce powierzchni i zachowaniu parametrów przekroju jest materiałem słabo rozprzestrzeniającym ogień, a dodatkowo impregnowane jest materiałem nierozprzestrzeniającym ognia. Pomimo to, drewno w wysokich temperaturach traci swoje właściwości, a co za tym idzie najprawdopodobniej spada jego wytrzymałość. W badaniach własnych dokonano analizy wytrzymałości na zginanie statyczne drewna klejonego w wysokich temperaturach, zbliżonych do temperatur pożaru. Na podstawie uzyskanych wyników określono prawdopodobieństwo zniszczenia elementu konstrukcji obciążonego statycznie w kolejnych przedziałach temperaturowych. Wykazano znaczący spadek niezawodności drewna klejonego oraz zaobserwowano zwiększoną dynamikę wzrostu poziomu zagrożenia po przekroczeniu temperatury 150°C.

Summary

Due to its properties glued timber is a commonly used material nowadays. Such technology enables production of the structural elements with large cross-sections and considerable span. The glued laminated timber after a proper surface treatment and with the preserved cross-section parameters, is a low fire spreading material, moreover it is additionally treated with a fire retardant. In spite of this, timber loses its properties in high temperatures, which most probably results in the strength reduction. In the conducted studies static bending strength analysis of the glued laminated timber in high temperatures, close to the fire conditions, was performed.

Based on the obtained results, probability of failure of the structural element statically loaded, in the subsequent temperature ranges, was estimated. A significant reliability decrease of the glued laminated timber and dynamic of the hazard level growth has been observed after exceeding 150°C.

Słowa kluczowe: drewno klejone, temperatury pożarowe, wytrzymałość na zginanie, niezawodność

Keywords: glued timber, fire temperatures, bending strength, reliability

1. Wstęp

Drewno budowlane ma korzystne właściwości fizyczne i technologiczne, wysoką wytrzymałość oraz niewielki ciężar własny. Wraz z pojawieniem się na rynku budowlanym wodoodpornych klejów na bazie żywic syntetycznych oraz zastosowanie prostego sposobu łączenia wzdużnego za pomocą złączy klinowych, umożliwiających znacznie szybszy sposób budowania z wykorzystaniem klejonych elementów konstrukcyjnych o wymiarach większych niż naturalny produkt wyjściowy [1].

Drewno konstrukcyjne klejone warstwowo jest materiałem coraz częściej stosowanym w budownictwie. Począwszy od budowy domów jednorodzinnych i wielorodzinnych oraz obiektów wielkogabarytowych typu hale produkcyjne, handlowe, sportowe, baseny, kończąc na mostach jednoprzęsłowych i obiektach małej architektury. Do produkcji elementów z drewna klejonego najczęściej stosowanym gatunkiem drewna 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 [2].

W zależności od wytrzymałości charakterystycznej na zginanie drewno klejone zostało podzielone na 4 klasy od GL24 do GL36. Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy budowlano-konstrukcyjnej zgodnie z wymaganiami normowymi (PN-D-91024:1982 [3]) 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 (PN-EN 1194:2000 [4]).

Drewno klejone warstwowo, po zapewnieniu odpowiednich warunków takich jak fazowane 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 [2].

Wykonywane dotychczas przez autorów próby na typowych stanowiskach wytrzymałościowych z wstępnym nagraniem próbek w piecu a następnie z przenoszeniem na stanowisko badawcze powodowały spadek temperatury podczas przenoszenia próbek, a co za tym idzie duże rozrzuty wyników badań wytrzymałości. W związku z tym w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie w ramach pracy statutowej zaprojektowano i zbudowano stanowisko do badań wytrzymałościowych z możliwością ogrzewania próbek bezpośrednio na stanowisku przy jednoczesnej realizacji obciążenia statycznego.

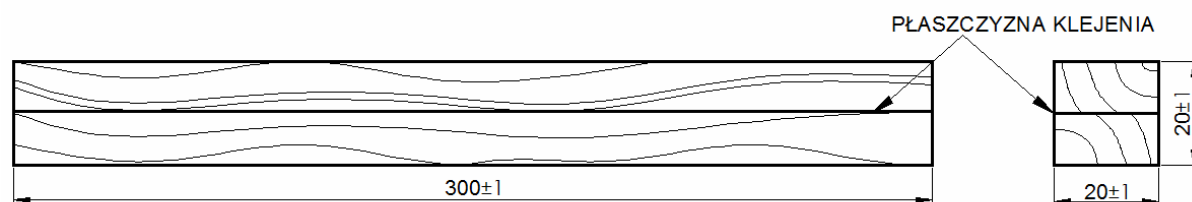
Celem badań wykonanych na tym stanowisku było określenie wpływu podwyższonych temperatur na wytrzymałość drewna klejonego warstwowo. Ponadto, uzyskane wyniki badań wytrzymałości posłużyły do przeprowadzenia analizy niezawodności drewna klejonego w wysokich temperaturach.

Najogólniej, niezawodność jest miarą zdolności do spełniania warunków, bądź utrzymania pewnych właściwości w czasie, który najczęściej jest ograniczony i określany mianem resursu. W przypadku konstrukcji statycznych możliwa jest ocena niezawodności na podstawie prawdopodobieństwa nie przekraczania stanu granicznego nośności lub zniszczenia konstrukcji [5]. 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 [6]. W tym konkretnym przypadku zawodność jak już wspomniano 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 [5]. W prezentowanej publikacji analizy dokonano na poziomie pierwszym w oparciu o wyniki badań wytrzymałości doraźnej w wysokich temperaturach.

2. Badany materiał

Próbki do badań zostały wykonane z drewna bielastego sosny pospolitej (*Pinus sylvestris L.*) jednesnie wszystkie próbki zostały pobrane z tego samego kawałka tarcicy. Do wykonania próbek został wykorzystany klej melaminowy Cascomin 1247 z utwardzaczem 2526. Zgodnie z informacjami podawanymi przez producenta klej Cascomin przeznaczony jest do zastosowań w produkcji drewnianych konstrukcji nośnych, połączeń palcowych i płyt blokowych. Klej 1274 w połączeniu z utwardzaczem 2526 znajduje zastosowanie w aplikacjach przemysłu drzewnego, gdzie wymagana jest jasna spoina klejowa z wysoką odpornością na wodę i warunki atmosferyczne [7]. Przed przystąpieniem do badań próbki leżakowały w temperaturze 20°C przez okres 6 miesięcy i miały wilgotność około 8%. Próbki do badań wytrzymałości na zginanie statyczne zostały wykonane w formie prostopadłościanów o wymiarach 20x20x300 mm (rys. 1).

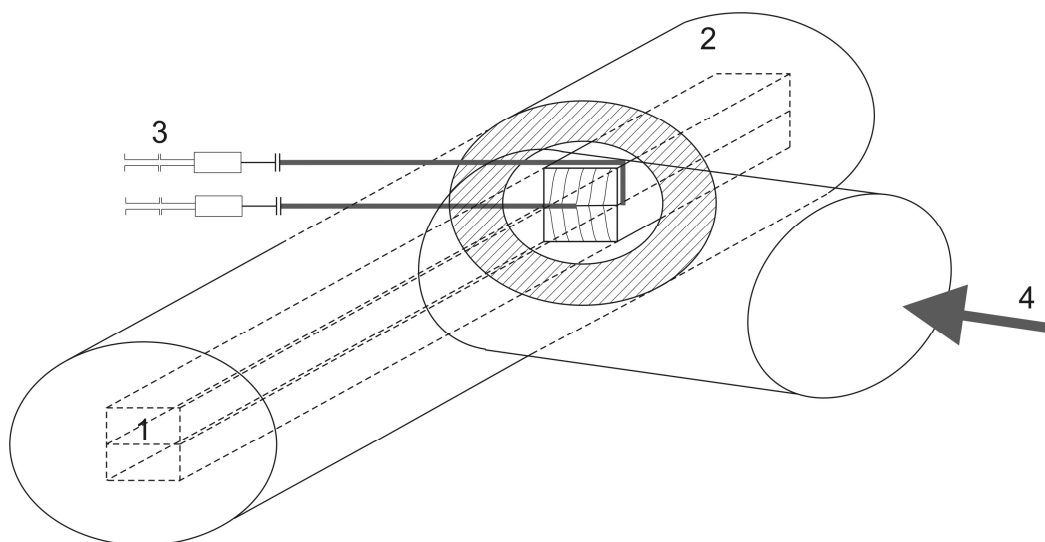


Ryc. 1. Próbki do badań wytrzymałości na zginanie/

3. Metoda badawcza

Badanie wytrzymałości 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 ma 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÷0,84 mm/min..

Próbki podczas badania wytrzymałości na zginanie umieszczone były w stalowej izolowanej cieplnie komorze cylindrycznej (rys. 2). 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 250-500 l/min. Czas nagrzewania określono jako czas, po którym termoparą umieszczoną wewnątrz próbki zmierzono temperaturę przyjętą w planie badań (rys.2). Oceny wytrzymałości dokonano w sześciu zakresach temperatury przy stałych czasach nagrzewanie podanych w nawiasach obok wartości temperatury: 20 °C, 50 °C (90s), 100 °C (140s), 150 °C (180s), 200 °C (240s), 230°C (280s).



Ryc. 2. Rozmieszczenie termoelementów do określenia czasów nagrzewania próbek:
 1 – próbka, 2 – stalowa komora cylindryczna, 3 – termoelementy pomiarowe, 4 – wlot gorącego powietrza

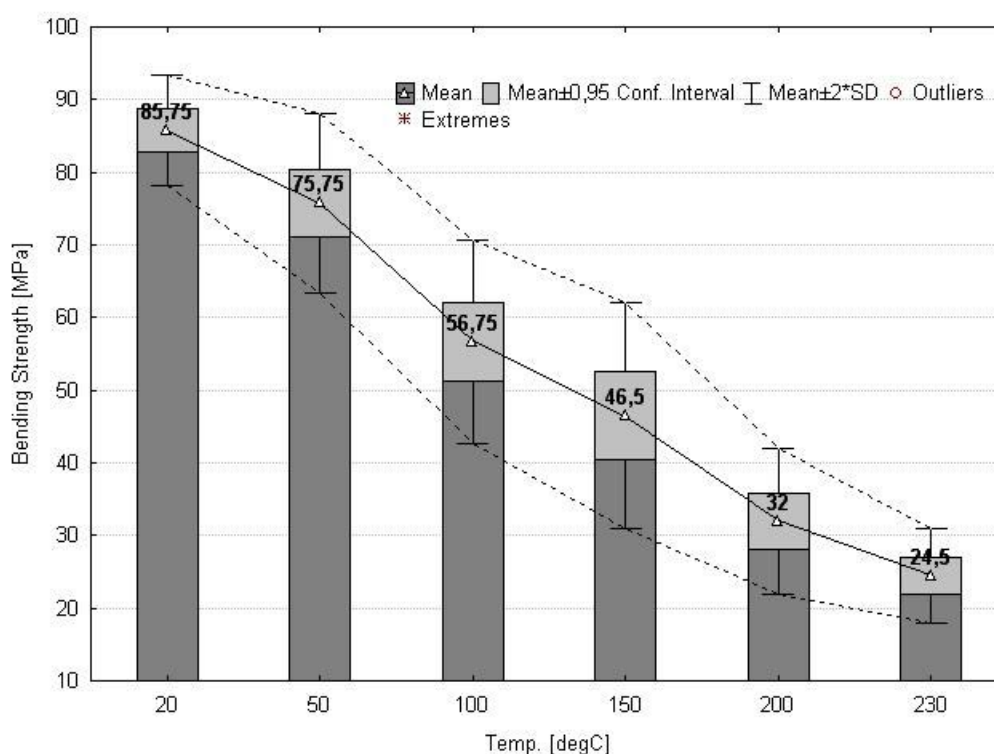
4. Wyniki badań

Badanie przeprowadzono na 54 próbkach z drewna sosnowego klejonego warstwowo, użyto po 9 próbek w każdym przedziale temperatury. Parametry statystyczne uzyskanych wyników badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 1.

Statystyki opisowe wyników badań

Temp. [°C]	N	Średnia / Mean	Min	Max	25 Percen.	75 Percen.	Odchyl. Std./ Std.Dev.	Odchyl. Std./ Std.dev. [%]
		[MPa]						
20	9	85,75	81,00	90,00	83,25	90,00	3,81	4,44
50	9	75,75	67,50	85,50	72,00	76,50	6,16	8,13
100	9	56,75	49,50	69,75	49,50	60,75	7,01	12,34
150	9	46,50	36,00	58,50	40,50	54,00	7,79	16,76
200	9	32,00	24,75	38,25	27,00	36,00	5,00	15,63
230	9	24,50	18,00	29,25	22,50	27,00	3,27	13,34

Graficzne miary zmienności uzyskanych wyników badań przedstawiono na wykresie ramkowym (rys. 3), wyróżniono wartości średnie, przedziały ufności, odchylenia standardowe oraz wartości ekstremalne i odstające.



Ryc. 3. Wykres ramkowy wyników wytrzymałości na zginanie

5. Niezawodność

Analiza niezawodności drewna konstrukcyjnego klejonego została przeprowadzona w oparciu o wyniki uzyskane w próbie wytrzymałościowej trójpunktowego zginania. Analizowano prawdopodobieństwo przetrwania – nie zniszczenia w funkcji wytrzymałości

(rys. 4) oraz w funkcji temperatury symulowanych warunków pożarowych (rys. 5). W analizie wykorzystano dwuparametrowy rozkład Weibulla. Dystrybuanta rozkładu Weibulla (z dodatnimi parametrami σ_0 , c , i σ_u), jest opisana zależnością [8]:

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

gdzie:

σ – obciążenie niszczące,

σ_0 – parametr skali,

c – parametr kształtu,

σ_u – parametr położenia,

e – stała ($e = 2.71828\dots$),

V – objętość próby.

W analizowanym przypadku P_f jest prawdopodobieństwem zniszczenia próbki z drewna klejonego. 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:

$$P_f = \left(\frac{n}{N^* + 1} \right) \quad (2)$$

gdzie:

N^* - całkowita liczba próbek,

n – rangowany zbiór próbek.

W przypadku gdy licznosc – objętość próby V jest stała we wszystkich grupach (po 9 dla kolejnych zakresów temperatury), można ją pominąć w obliczeniach [9, 10].

Przyjęcie parametru położenia $\sigma_u = 0$ sprowadza rozkład Weibulla do dwuparametrowego. Założenie powyższe w przypadku materiałów kruchych, sprowadza

zakres prawdopodobieństwa zniszczenia do początku w miejscu znanej wcześniej wspomnianej największej wartości obciążenia niszczącego. Przy tych założeniach równanie przyjmie następującą postać:

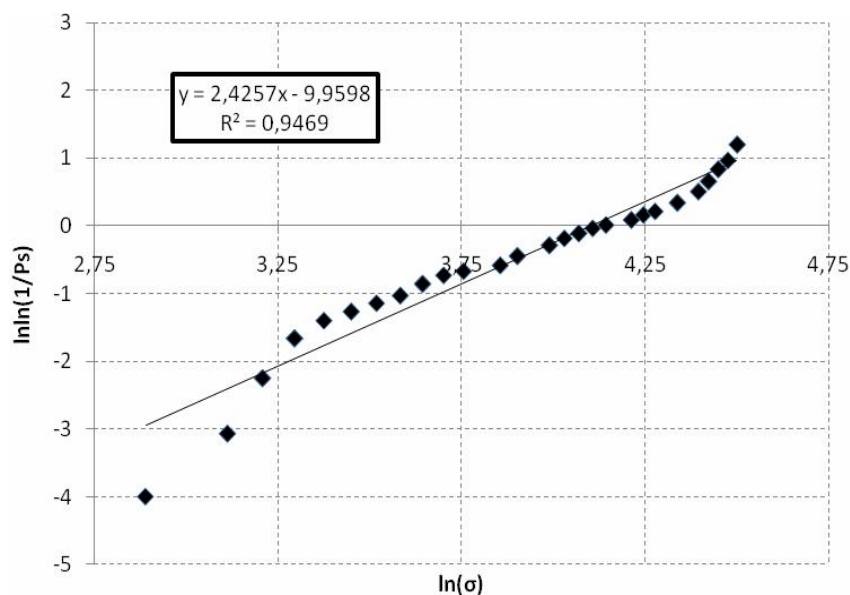
$$1 - P_f = 1 - \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^c \right] \right) \quad (3)$$

Powyższe równanie może być uproszczone, przy użyciu logarytmowania do postaci $y = ax + b$ przez:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = c \ln(\sigma) - c \ln(\sigma_0) \quad (4)$$

gdzie:

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

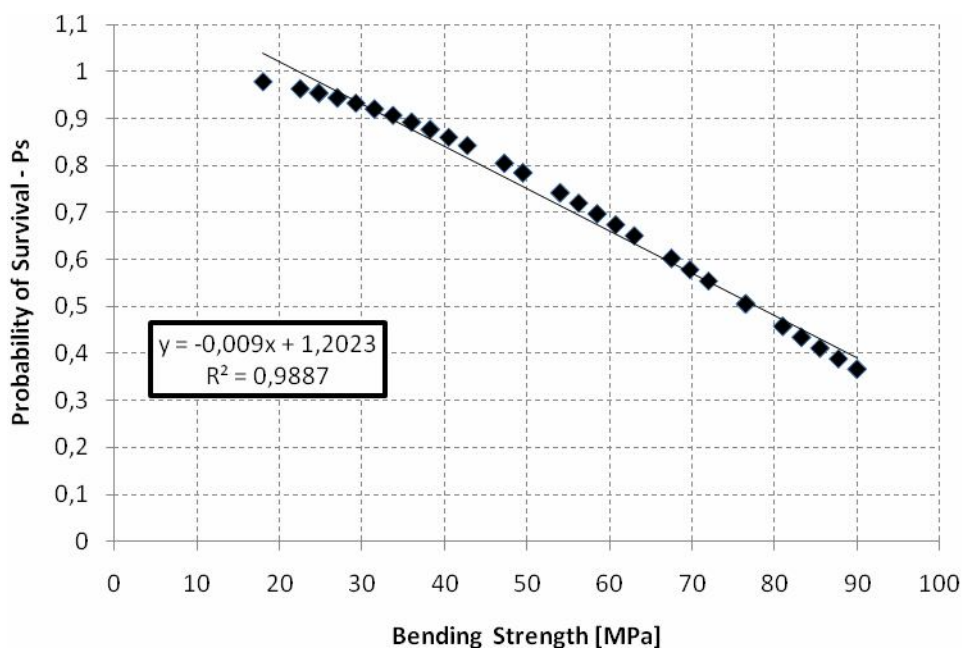


Ryc. 4. Rozkład logarytmiczny prawdopodobieństwa zniszczenia w funkcji wytrzymałości na zginanie drewna klejonego poddanego oddziaływaniu wysokich temperatur

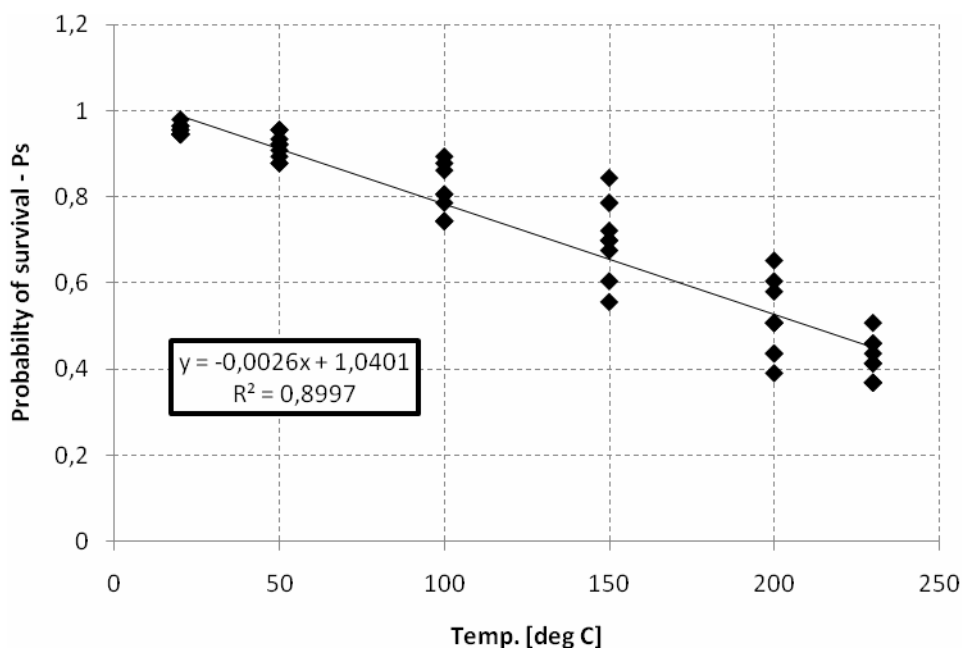
Przecięcie osi Y jest zależne od $-c \ln(\sigma_0)$, nachylenie krzywej jest parametrem kształtu rozkładu Weibulla c ($c = 2,37258$). Liczność próby badawczej wpływa na wartość

współczynnika determinacji R^2 , który decyduje o jakości predykcji parametrów rozkładu Weibull'a [11]. Oznacza to, że im jest on wyższy tym wyższa jest jakość doboru parametru kształtu rozkładu ($R^2 = 0,9469$ – rys. 4).

Rozkłady prawdopodobieństwa nie zniszczenia w funkcji wytrzymałości na zginanie i temperatury przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Ryc. 5. Prawdopodobieństwo nie zniszczenia drewna klejonego poddanego obróbce termicznej w funkcji wytrzymałości na zginanie



Ryc. 6. Prawdopodobieństwo nie zniszczenia drewna klejonego poddanego obróbce termicznej w funkcji temperatury

6. Funkcja zagrożenia – intensywność prawdopodobieństwa zniszczenia

Intensywność prawdopodobieństwa zniszczenia jest to prędkość, z którą przyrasta zawodność w kolejnych zakresach temperatury w stosunku do niezawodności, która w tym przypadku określana jest mianem prawdopodobieństwa przetrwania.

$$h(T) = \frac{dQ/dT}{R(T)} \quad (4)$$

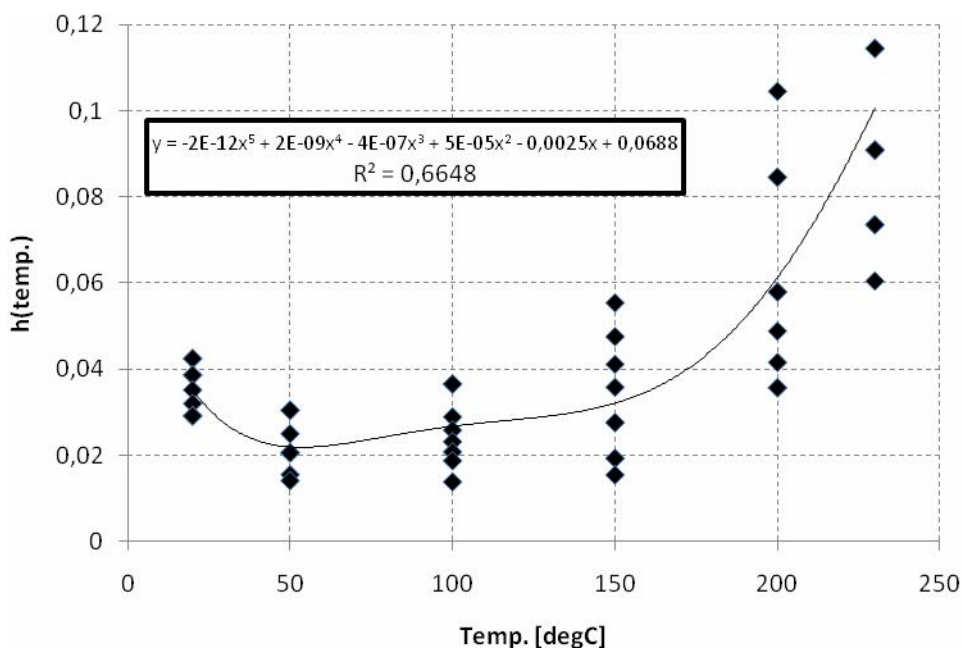
gdzie:

Q – zawodność,

T – temperatura [$^{\circ}C$],

$R(T)$ – niezawodność.

Rozkład intensywności prawdopodobieństwa zniszczenia – przebieg funkcji zagrożenia przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Intensywność prawdopodobieństwa zniszczenia w funkcji temperatury

Utylitaryzm prezentowanej metody oceny niezawodności materiałów konstrukcyjnych jest ograniczony tylko do prezentowanego poziomu analizy niezawodności – poziom pierwszy odnoszący się do jednego z elementów konstrukcji. Oznacza to, że prezentowana analiza nie uwzględnia redystrybucji sił do innych elementów konstrukcji. Jednakże w przypadku całych sekcji konstrukcji, które zazwyczaj są szeregowymi zbiorami elementów, w analizie niezawodności, ocenie często poddaje się tzw. najsłabsze ogniwo. Niezawodność całej sekcji będącej układem szeregowym jest w najprostszym ujęciu iloczynem niezawodności elementów składowych. 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 [5].

7. Podsumowanie

Wraz ze wzrostem temperatury obserwuje się wzrost odchylenia standardowego wyników wytrzymałości na zginanie statyczne, co prawdopodobnie wynika ze zwiększenia się kruchości drewna sosnowego na skutek intensywnego wysychania i postępującego rozkładu termicznego. Jest to niekorzystne zjawisko ponieważ znacząco ogranicza możliwość

oceny stanu konstrukcji oraz predykcji poziomu zagrożenia już w początkowym stadium pożaru, gdy temperatury elementów konstrukcji są niższe od temperatury zapłonu.

Prawdopodobieństwo przetrwania badanego materiału (klejonego drewna sosny pospolitej), poddanego obciążeniom zginającym spada poniżej poziomu 60% w temperaturze 150°C, po przekroczeniu tego samego zakresu temperatury obserwuje się również znaczący wzrost dynamiki prawdopodobieństwa zniszczenia drewna, a co za tym idzie, wzrasta poziom niebezpieczeństwa. Praktyczny sens tej informacji jest znaczący, ponieważ umożliwia ocenę stanu badanego elementu tylko w oparciu o pomiar temperatury, który oczywiście może być wykonany bezstykowo. Uzyskane wyniki i symulacje na małych laboratoryjnych próbkach klejonego drewna sosnowego będzie można wykorzystać przy analizie pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych.

Badania potwierdziły przydatność stanowiska opracowanego w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP do badań porównawczych drewna klejonego w symulowanych warunkach temperatur pożarowych.

Literatura

1. Neuhaus H., *Budownictwo drewniane, podręcznik inżyniera*, Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2006;
2. Przepiórka J., Żurowski P., *Konstrukcyjne drewno klejone*, Inżynier Budownictwa 10, (2008), 60-64;
3. PN-D-91024:1982 *Tarcica iglasta konstrukcyjna sortowana metodami wytrzymałościowymi*;
4. PN-EN 1194:2000 *Konstrukcje Drewniane. Drewno klejone warstwowo. Klasy wytrzymałości i określenie wartości charakterystycznych*;
5. Murzewski J., *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*, Wyd. Arkady, Warszawa 1989;
6. Bąk R., Burczyński T., *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, wyd. WNT, Warszawa 2001;
7. <http://www.sezam-wrzesnia.com.pl/>.
8. Migdalski J., *Inżynieria niezawodności*, Poradnik. Wyd. ATR ZETOM, Warszawa 1992;

9. 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 22, (1973), 453—87;
10. Davies D.G.S., *The statistical approach to engineering design in ceramics*, Proceedings of the British Ceramic Society 22, (1973), 429—52;
11. Ritter J.E., Bandyopadhyay N., Jakus N., *Statistical reproducibility of the dynamic and static fatigue experiments*, Ceramic Bulletin 60, (1981), 798—806.

Recenzenci

dr hab. inż. Paweł Kozakiewicz

dr inż. Tomasz Krysztofiak