

Dorota KRAM*
Politechnika Krakowska

UWZGLĘDNIENIE PRZESTRZENNEJ PRACY KONSTRUKCJI DREWNIANYCH W OCENIE ODPORNOŚCI OGNIOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono bardzo krótką charakterystykę procesu spalania drewna, podano propozycję obliczeń odporności ogniowej konstrukcji drewnianych z drewna klejonego i sposób uwzględnienia zmian warunków pracy elementów z drewna klejonego podczas pożaru.

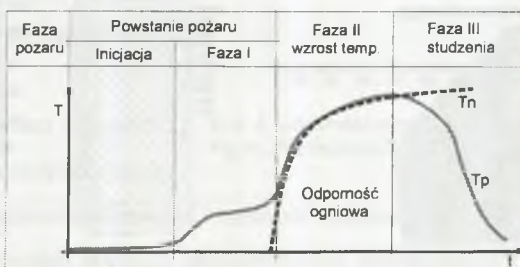
THE WAY OF TAKING INTO ACCOUNT TIMBER CONSTRUCTION SPATIAL WORK IN EVALUATION OF FIRE RESISTANCE

Summary. A short characteristic of wood burning process is presented in the paper. A proposal of fire resistance calculation of lumber constructions and the way of taking into consideration changes of their work conditions during fire are also given.

1. Oddziaływanie temperatur pożarowych na konstrukcję

W przypadku wystąpienia w pomieszczeniu pożaru teoretycznie można wyróżnić trzy charakterystyczne fazy jego przebiegu:

- I faza (faza rozwoju),
- II faza (faza intensywnego spalania),
- III faza (faza stygnięcia).



Rys. 1. Fazy pożaru a normowa krzywa nagrzewania T_n
Fig 1. Phase of the fire and curve of rate hates

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Antoni Stachowicz.

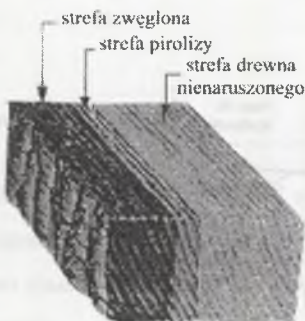
Na użytek badań odporności ogniowej elementów konstrukcji przyjęto w skali międzynarodowej standardowy przebieg nagrzewania elementów podczas pożaru zgodnie z *temperaturą standardową** określoną wg wzoru:

$$T_n = 345 \lg(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

gdzie: T_n - standardowa temperatura nagrzewania elementu próbnego [°C], t - czas [min].

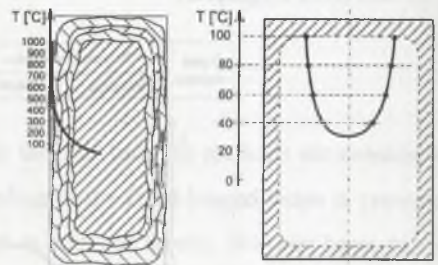
2. Palność drewna i jego odporność ogniowa

W temperaturze zapalenia, wynoszącej przy bezpośrednim dostępie ognia do drewna 260°C, następuje zapalenie się gazów i rozpoczyna się proces chemiczny wiązania węgla zawartego w drewnie z tlenem, któremu towarzyszy gwałtowne wydzielanie ciepła. Zapalenie drewna bywa poprzedzone pojawieniem się krótkich płomyków zapalających się gazów wydzielanych z drewna (tzw. punkt błysku) w temperaturze 225÷ 250°C. Jeśli nie ma bezpośrednio oddziaływania ognia na drewno, a działa jedynie temperatura, to drewno zapala się w wyższej temperaturze, wynoszącej 330 ÷ 400°C. W czasie spalania w sposób w miarę równomierny zwiększa się warstwa węgla na powierzchni drewna, której kruchość i przyczepność zależy od gatunku drewna. Warstwa ta o strukturze porowatej (w wyniku termicznego rozkładu – pirolizy, pozostaje około 15% substancji stałych) ma małą przewodność cieplną i dzięki temu znacznie utrudnia dostęp ciepła do nie zwęglonego wnętrza elementu, a także utrudnia dostęp tlenu, spowalniając proces spalania.



Rys. 2. Warstwy drewna w fazie spalania
[www.fireretard.com/building.html]

Fig. 2. Layers of wood in phase of combustion



Rys. 3. Przekrój eksponowany z 4 stron - rozkład temperatury w jądrze belki [12 x 18 cm]

Fig. 3. Wood member exposed from 4 sides

Prędkość narastania warstwy zwęglonej na powierzchni i zarazem zmniejszania się jądra przekroju zależy od gatunku drewna i jego wilgotności początkowej. Różnica ta widoczna jest również pomiędzy drewnem litym i klejonym.

Tabela 1

Prędkość zwęglania drewna i materiałów drewnopochodnych np. wg ÖNORM B 3800 cz. 4

Rodzaj materiału:	Prędkość zwęglania [mm / min]
Drewno budowlane wg ÖNORM B 4100 / 2	
dąb	0,50
świerk (również klejony)	0,65
sosna	0,75

W większości krajów na podstawie badań do obliczeń odporności ogniowej konstrukcji drewnianych wartość prędkości zwęglania (β) przyjmowana jest na poziomie 0,6 mm/min. Obecnie zaleca się przyjmować dla drewna klejonego warstwowo wartość 0,6 mm/min, a drewna litego 0,8 mm/min. Wyższa wartość dla drewna litego w porównaniu z drewnem klejonym uzasadniona jest naturalną cechą drewna powodującą spękania podłużne belek, dające możliwość głębszej penetracji procesu spalania.

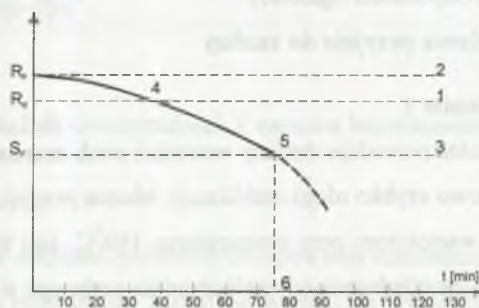
Zalecenia wynikające np. z austriackiej normy (ÖNORM) dla drewna litego (budowlanego) ilustruje tabela 1.

3. Odporność ogniowa konstrukcji w rzeczywistym pożarze

W efekcie działania rzeczywistych temperatur pożarowych ulega zmianie temperatura konstrukcji, a właściwości mechaniczne wyraźnie się pogarszają. W konsekwencji nośność przekroju maleje, aż do całkowitego wyczerpania (rys. 4).

Na rys 4. zilustrowano odporność ogniową elementów konstrukcyjnych,

gdzie przyjęto następujące oznaczenia: 1 - nośność obliczeniowa przekroju: siła graniczna R_d obliczona z uwzględnieniem wartości obliczeniowych wytrzymałości, 2 - nośność w stanie awaryjnym: siła graniczna R_F obliczona przy przyjęciu wartości charakterystycznych wytrzymałości, 3 - wartość uogólnionej siły wewnętrznej obliczonej dla układu obciążeń i ich wartości miarodajnych w sytuacji pożarowej S_p 4 - zmiana nośności (wartości siły granicznej



Rys. 4. Odporność ogniowa elementów konstrukcyjnych: [x]
Fig. 4. Fire resistance of exposed construction members

R_f) w wyniku działania pożaru na skutek zmiany cech mechanicznych drewna oraz redukcji pola przekroju, 5 - punkt krytyczny, 6 - punkt odporności ogniowej.

4. Nośność przekrojów elementów drewnianych w trakcie pożaru (spalania) – założenia

Zgodnie z definicją *odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych*, obliczenie tej odporności polega na wyznaczeniu czasu t_f , w którym w wyniku pożaru nośność elementu zostanie zredukowana do wartości równej obciążeniu przekroju w tymże czasie. Warunek graniczny dla konstrukcji z drewna przedstawiony może być w następującej formie:

$$M(\Phi) = M_n[J(t), f_m(t, T)] \quad (2)$$

gdzie:

$M(\Phi)$ – moment zginający od obciążeń awaryjnych (obciążenia wyjątkowe w trakcie pożaru),

M_n – moment niszczący, którego wartość jest funkcją czasu,

$J(t)$ – moment bezwładności przekroju zmieniający się wraz z czasem trwania pożaru,

$f_m(t, T)$ – skorygowana wytrzymałość drewna przy zginaniu wewnątrz jądra przekroju; w ogólnym przypadku jest to funkcja czasu i temperatury

Obliczony z warunku czas $t = t_f$ powinien być nie mniejszy od określonego wymaganą klasą odporności ogniowej¹.

Założenia przyjęte do analizy

Założenie 1

Pożar powoduje zmiany wartości cech mechanicznych drewna. Proces tych zmian stopniowo szybko ulega stabilizacji. Można przyjąć, że aż do zniszczenia wartości te odpowiadają wartościom przy temperaturze 100°C. Jest to wartość charakterystyczna zredukowana, tzn. z uwzględnieniem współczynnika podanego w poniższej tabeli.

Tabela 2

Współczynniki korekcyjne do cech mechanicznych drewna przy obciążeniach pożarowych

Cecha	Współczynnik redukcyjny
Wytrzymałość przy ściskaniu	0.750
Wytrzymałość przy rozciąganiu	0.800
Wytrzymałość przy zginaniu	0.800
Moduł sprężystości	0.800

¹Klasa odporności ogniowej – określona czasem cecha charakteryzująca odporność ogniową elementu budynku – np. klasa odporności ogniowej stropodachów i dachów R15, R30, R60, R90, R120; RE15, RE30 ...; REI15, REI30 ... [wg normy PN-B-02851-1: 1997].

Założenie 2

Zmiana parametrów geometrycznych przekroju elementów ma charakter liniowy. Funkcję zmiany przekroju możemy zapisać w następującej formie dla belki poddanej działaniu ognia z czterech stron:

$$\begin{aligned} b(t) &= b - 2\beta t \\ h(t) &= h - 2\beta t \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

b – szerokość;
h – wysokość;
 β – prędkość zwęglania drewna;
wprowadzając oznaczenie:

$$\eta = h/b \quad (4)$$

zależność na wysokość przekroju, jeśli ogień działa z czterech stron, przyjmie formę:

$$h(t) = \eta b - 2\beta t \quad (5)$$

Wobec powyższego wskaźniki charakteryzujące przekrój zapisać można następująco:

- przy działaniu ognia z **czterech** stron:

$$\begin{aligned} A(t) &= (b - 2\beta t) * (\eta b - 2\beta t) \\ W(t) &= 1/6 * (b - 2\beta t) * (\eta b - 2\beta t)^2 \\ J(t) &= 1/12 * (b - 2\beta t) * (\eta b - 2\beta t)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

η - wprowadzone podstawienie (5),
A, W, J - odpowiednio pole powierzchni, wskaźnik wytrzymałości i moment bezwładności przekroju.

Założenie 3

Przyjmuje się, że kombinacja wyjątkowa obciążeń pożarowych odpowiada kombinacji, w której wartości obliczeniowe od obciążenia pożarowego przyjmuje wartość ze współczynnikiem 1.

5. Równania dla warunku granicznego**NOŚNOŚĆ PRZEKROJU PRZY ZGINANIU**

Obliczając moment dla wyjątkowej kombinacji obciążeń pożarowych $M(\Phi)$ oraz moment niszczący przekroju smukłego w pożarze, otrzymujemy przy oddziaływaniu ognia z czterech stron:

$$M(\Phi) = M_n = f_m \cdot W(t) = f_m \cdot 1/6 \cdot (b - 2\beta t) \cdot (\eta b - 2\beta t)^2 \quad (7)$$

Po odpowiednich przekształceniach otrzymujemy przy oddziaływaniu ognia z czterech stron

$$t^3 \left(4\beta^3/3 \right) - t^2 \left(2b\beta^2/3 + 4\eta b\beta^2/3 \right) + t_f \left(2\eta b^2\beta/3 + \eta^2 b\beta/3 \right) - \eta^2 b^3/6 + M(\Phi)/f_m = 0 \quad (8)$$

NOŚNOŚĆ PRZEKROJU DLA ELEMENTÓW ŚCISKANYCH

Dla elementów ściskanych, gdy spełniony jest przynajmniej jeden z warunków

$$\lambda_c \leq 15 \quad \text{lub} \quad \lambda_{rel} \leq 0,500 \quad (9)$$

otrzymujemy wzór

$$t_f^2 - t_f (b + h) / \beta + (A_p - N(\Phi)/f_c) / \beta = 0 \quad (10)$$

Decydujący wpływ efektów pracy przestrzennej na odporność ogniową konstrukcji z drewna klejonego powoduje, że problem ich odporności ogniowej powinien być uwzględniony w projektowaniu jako element racjonalnego kształtowania układu konstrukcyjnego, a nie tylko w formie sprawdzania odporności ogniowej już zaprojektowanego układu, stąd ocena odporności ogniowej elementów z drewna (m.in. z drewna klejonego) jest istotnym elementem analizy konstrukcji.

6. Ilustracja problemu - ocena odporności ogniowej elementów z drewna klejonego

Przykład 1

Obliczenie odporności ogniowej belki zginanej z drewna klejonego z warunku stanu granicznego nośności. Dane do przykładu:

$b=20$ cm, $h= \eta b$, $\eta \in \{5,10\}$, $\beta=0.06$ cm/min, drewno klejone klasy GL35, $f_{mk}=35$ MPa

Wprowadzając oznaczenia:

$$M_n = f_{mk} \cdot bh^2/6, \quad M(\Phi)=0.6 \cdot M_n \quad (11)$$

podstawiając wymiary do równania (8), rozwiązując je otrzymujemy graniczną wartość czasu $t = t_f$ (tabela 3, kolumna 5). Znając wartość t_f z warunku stanu granicznego nośności, odpowiednio podstawiając do warunku (6) obliczono wartość $b(t)$ dla czasu $t = t_f$ (tabela 3, kolumna 6).

Tabela 3

Obliczenie ognioodporności belki z drewna klejonego

Oddziaływanie ognia	Wartość wprowadzona $\eta=h/b$	Wartość h [cm]	Wartość założona b [cm]	Odporność ogniowa t_r [min]	Wartość wyliczona $b(t)$ [cm]
1	2	3	4	5	6
Oddziaływanie ognia z trzech stron	5	100	20	82	10,2
	8	160		85	9,8
	10	200		86	9,7
Oddziaływanie ognia z czterech stron	5	100	20	74	11,1
	8	160		80	10,4
	10	200		82	10,2

Widać tu wyraźnie, że przy proporcjach wymiarów stosowanych w elementach z drewna klejonego

$$\eta = h/b \in \{7, 10\} \quad (12)$$

$$\eta = h/b \in \{7, 14\} \quad (13)$$

otrzymujemy znaczne osłabienie przekroju w zakresie odporności ogniowej 74-86 min. (porównaj kol. 5 i 6 tablicy 3)

Widać wyraźnie, że element ulega znacznemu zwężeniu co może prowadzić do zniszczenia na skutek utraty stateczności przy zginaniu znacznie wcześniej aniżeli wynikałoby to z czasu obliczonego tylko z warunku dla przekroju elementu w warunkach podstawowych.

UWZGLĘDNIENIE WYBOCZENIA PRZY ZGINANIU

Przy projektowaniu elementów zginanych o przekroju smukłym, przy ocenie ich odporności ogniowej, należy więc zawsze wprowadzać do warunku (2) współczynnik wybozczeniowy przy zginaniu, zależny od zmiennych w czasie pożaru parametrów geometrycznych przekroju.

Wzór na $\lambda_{real,m}$ jako funkcje czasu trwania pożaru przedstawić można następująco:

$$\lambda_{real,m} = \frac{1}{b(1-2t\beta/b)} \sqrt{\frac{l_d h(1-2t\beta/h) f_{m,k}}{\pi E_{0,05}}} \sqrt{\frac{E_{0,mean}}{G_{mean}}} \quad (14)$$

gdzie:

$\lambda_{real,m}$ – smukłość sprowadzona (względna),

$E_{0,mean}$ – wartość średnia modułu sprężystości skorygowana współczynnikiem wg tabeli 2.

Na podstawie wartości $\lambda_{\text{real},m}$ określana jest wartość współczynnika wyboczeniowego k_{crit} z rozdzielnych zbiorów określonych warunkami:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{real},m} \leq 0.75 & \Rightarrow k_{\text{crit}} = 1, \\ 0.75 < \lambda_{\text{real},m} \leq 1.4 & \Rightarrow k_{\text{crit}} = 1,56 - 0,75 \lambda_{\text{real},m} \\ 1.4 < \lambda_{\text{real},m} & \Rightarrow k_{\text{crit}} = 1/\lambda_{\text{real},m}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie: k_{crit} – współczynnik wyboczeniowy.

Nieciągłość funkcji definiujących wartość współczynnika wyboczeniowego przesądza o konieczności wyznaczania odporności ogniowej metodą iteracyjną. W pierwszym kroku obliczamy współczynnik k_{crit} dla czasu t_{f1} odpowiadającego wymaganej klasie odporności ogniowej. Tak obliczoną wartość podstawimy do (2) i obliczamy graniczną wartość czasu. Dla działania ognia z czterech stron i wyznaczenia czasu odporności ogniowej uzyskuje się równanie:

$$t^3_f(4\beta^3/3) - t^2_f(2b\beta^2/3 + 4\eta b\beta^2/3) + t_f(2\eta b^2\beta/3 + \eta^2 b\beta/3) - \eta^2 b^3/6 + M(\Phi)/0.800 k_{\text{crit}(15,30,60)} f_{mk} = 0 \quad (16)$$

Jeżeli obliczona na tej podstawie wartość t_f spełnia warunek:

$$t_f > t_{f1} \quad (17)$$

to element ma wyższą odporność ogniową od określonej wymaganej klasą odporności ogniowej. Jeżeli nie, to oczywiście, należy powiększyć przekrój elementu, a sprawdzenie powtórzyć.

Przykład 2

Dane do przykładu: $b=20$ cm, $h=\eta b$, $\eta=5$, $\beta=0.06$ cm/min, $l_d = 320$ cm, drewno klejone klasy GL35: $f_{mk}=35$ MPa, $E_{o,mean}=13$ GPa, $G_{mean}=0,81$ GPa, $E_{o,05}=8,7$ GPa
Obliczamy $\lambda_{\text{real},m}$ jako funkcje czasu trwania pożaru dla $t=0$, $t=30$, $t=60$, (wartości normowe) $t=74$ min (wartość graniczna): podstawiając dane do wzoru (14) dla poszczególnych czasów otrzymujemy następujące wyniki (patrz tabela).

Tablica 4

Nośność przekroju belki z drewna klejonego do przykładu 2

moment [kN m]	wartość t=0 min	wartość t=30 min	wartość t=60 min	wartość t=74 min
nośność przekroju ^(*)	1 167	889	643	539
nośność elementu z uwagi na wyboczenie ^(**)	1 167	700	430	317
$\lambda_{real, m}$	0.641	0.767	0,964	1,1
k_{crit}	1	0.985	0,837	0,727

gdzie:

$$(*) \quad M = f_{mk} * W(t)$$

$$(**) \quad M = k_{crit} * \alpha * f_{mk} * W(t)$$

gdzie:

- f_{mk} – wytrzymałość charakterystyczna drewna klejonego na zginanie,
 $\alpha = 0.8$ – współczynnik redukcji wytrzymałości w warunkach ogniowych,
 k_{crit} – współczynnik wybożeniowy.

UWAGI UZUPEŁNIAJĄCE

W kontekście oceny zachowania się układu konstrukcyjnego w pożarze, problem określenia odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, w ogólnym przypadku, może prowadzić do trzech różnych zadań:

- o zniszczeniu elementu decyduje jedynie jego odporność ogniowa; przed osiągnięciem stanu granicznego przekroju elementu nie ulegną zmianie pozostałe warunki pracy elementu i jego schemat statyczny,
- stan graniczny będzie osiągnięty w sytuacji, gdy ulegną zmianie warunki pracy elementu,
- stan graniczny będzie osiągnięty po zmianie zarówno warunków pracy elementu, jak i jego schematu statycznego.

LITERATURA

1. Kosiorek M., Pogorzelski J., Laskowska Z., Pilich K.: Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych, Arkady Warszawa 1988.
2. Stachowicz A., Kram D.: Obliczanie odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych z drewna w kontekście PrPN-B-3150 oraz Eurokodu 5, Inżynieria i Budownictwo nr 4-5, 2000 s. 223-229.

3. EUROCODE 5, Projektowanie konstrukcji drewnianych cz.1.1. Zasady ogólne i zasady dla budynków. Wersja polska. Wydanie ITB, Warszawa 1995.
4. PrPN-B-03150: 1999 Konstrukcje drewniane, Obliczenia statyczne i projektowanie.

Recenzent: Prof. dr hab. inż Jan Kubik

Abstract

A short characteristic of wood burning process is presented in the paper. A proposal of fire resistance calculation of lumber constructions and the way of taking into consideration changes of their work conditions during fire are also given.

* Def. Wg PN-B-02851-1: 1997 Ochrona przeciwpożarowa budynków. Badania odporności ogniowej elementów budynków. Wymagania ogólne i klasyfikacja.