

kpt. mgr inż. Mariusz Dębski*
dr inż. Paweł Sulik**

Szacowanie nośności belek drewnianych w sytuacji ogniowej

Estimating the load-bearing capacity of timber beams in fire conditions

Streszczenie. W artykule przedstawiono tablice i wykresy pozwalające oszacować nośność na zginanie drewnianych belek w sytuacji wyjątkowej, jaką jest pożar. Wykorzystując algorytmy zawarte w eurokodach, autorzy zaproponowali łatwe w użyciu przez rzeczoznawców ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych i pracowników prewencji PSP, nomogramy przydatne w ocenie odporności ogniowej zginanych, drewnianych elementów nośnych (belek).

Słowa kluczowe: wymiarowanie zginanych elementów drewnianych, sytuacja pożarowa, szacowanie nośności.

Abstract. The paper presents graphs and tables allow to estimate the load-bearing capacity of bending timber beams in a fire conditions. Using algorithms contained in the EN standards, authors proposed easy-to-use nomograms useful in the evaluation of fire resistance to bending timber load-bearing elements.

Keywords: timber elements, beams, bending, fire situations, load-bearing capacity.

Z punktu widzenia rzeczoznawcy ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz funkcjonariusza prewencji Państwowej Straży Pożarnej (PSP) niezwykle istotną jest weryfikacja poprawności przyjętych rozwiązań projektowych, mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo pożarowe budynków. Weryfikacja wymagań wynikających z aktów prawnych, świadectw dopuszczeń, certyfikatów, deklaracji właściwości użytkowych itp. należy do standardowych czynności oceniających. Inaczej jest w przypadku oceny obliczeń konstrukcyjnych, które wymagają zupełnie innego przygotowania zawodowego oraz znacznie bardziej ukierunkowanej wiedzy z dziedziny projektowania konstrukcji. Szczególnie jest to trudne w przypadku, kiedy zachowanie w sytuacji wyjątkowej, jaką jest pożar, powiązane jest z obliczeniami dotyczącymi stałej sytuacji projektowej, a tak jest w przypadku wymiarowania wg eurokodów. Wycofanie ze zbioru PKN wielu konstrukcyjnych norm serii PN-B i zastąpienie ich eurokodami, w tym EC5 poświęconym konstrukcjom drewnianym, umożliwia projektantom wymiarowanie konstrukcji drewnianych zarówno w sytuacji normalnej, jak i pożarowej, uzależniając między sobą obydwa działania. Wymaga to przeprowadzenia obliczeń wg algorytmu uwzględniającego wiele czynników, co implikuje zaangażowanie czasowe i specjalistyczną wiedzę. Dużym ułatwieniem dla rzeczoznawców ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz funkcjonariuszy prewencji Państwowej Straży Pożarnej, dysponujących zazwyczaj niepełną wiedzą z dziedziny wymiarowania elementów konstrukcyjnych, są zaproponowane w artykule tabele i nomogramy pozwalające na oszacowanie nośności ogniowej zginanych elementów drewnianych, bazujące na postanowieniach eurokodów. Mierząc w naturze przekrój poprzeczny elementu i zakładając klasę drewna konstrukcyjnego, oceniający może bardzo szybko odczytać maksymalny dopuszczalny moment zginający, a w efekcie dopuszczalne obciążenie, jakie może przenieść element zginany, przy założeniu nieprzekroczenia założonego kryterium nośności ogniowej, np. R 30.

Założenia

Wymiarowanie drewnianych elementów zginanych w sytuacji normalnej wg eurokodów jest bardzo dobrze opisane zarówno w normie PN-EN 1995-1-1 [7], jak również w literaturze, np. przekrojowej książce Porteous i Kermani [1]. Nieco mniej szczegółowo, z uwagą na pewne nieścisłości interpretacyjne w PN-EN 1995-1-2 [8], opisano wymiarowanie konstrukcji drewnianych w sytuacji pożarowej. W tym wypadku, oprócz przytoczonej normy, dostępne są również prace m.in. [2, 3, 4, 5] uszczegółowujące zagadnienia związane z projektowaniem w sytuacji ogniowej. Znaczna część prac wykorzystuje pewne uproszczenia związane z pominięciem smukłości elementów zginanych na nośność w warunkach pożarowych, co w większości spotykanych przypadków, np. takich jak przekroje cieślińskie, ma swoje uzasadnienie. Wpływ smukłości jest szczególnie istotny w przypadku smukłych inżynierskich konstrukcji belek, np. wykonanych z drewna klejonego (element o początkowej smukłości przekroju 10, $h/b = 1000/10$, po 30 min oddziaływania ognia, przy założeniu obliczeń z wykorzystaniem przekroju efektywnego, ma smukłość $h_{ef}/b_{ef} = 972/44 = 22,09$), natomiast ma mniejsze znaczenie w przypadku elementów z drewna litego, gdzie mamy do czynienia z bardziej krępyimi przekrojami, ewentualnie przekrojami z drewna klejonego, których smukłość początkowa przekroju nie przekracza 4. Szczegółowe wyliczenia określające wpływ smukłości elementów zginanych na nośność w warunkach pożarowych zostały opisane w pracy Nowaka [6].

Przy opracowywaniu przedstawionych w artykule nomogramów nośności nie uwzględniono wpływu smukłości. Założeniem nomogramów jest, aby na podstawie pomiarów przekroju poprzecznego elementu w naturze, zakładając (na podstawie oceny lub dostarczonych dokumentów) klasę drewna konstrukcyjnego, oceniający mógł bardzo szybko odczytać maksymalny dopuszczalny moment zginający (tabela 1), a w efekcie i dopuszczalne obciążenie, jakie może przenieść element zginany, przy założeniu nieprzekroczenia założonego kryterium nośności ogniowej. Wszystkie wartości momentów zginających podane w tabelach odnoszą się do sytuacji wyjątkowej (pożaru), obliczonych przez zalecaną metodę zredukowanego przekroju. Tabele dotyczą odporności ogniowej do 30 (tabela 1) oraz 60 min. Obliczenia z wyko-

* Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, PSP JRG Wągrowiec

** Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Tabela 1. Tabełacyjne wyznaczanie maksymalnego momentu zginającego $M_{Rd,fi}$ [Źródło: opracowanie własne]

Klasa drewna C 27									
Szerokość [mm]	80	100	120	140	160	180	200	220	240
80	0,2	0,5	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4
100	0,4	0,7	1,1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5
120	0,5	1,0	1,6	2,1	2,6	3,2	3,7	4,2	4,8
140	0,6	1,2	2,0	2,7	3,4	4,1	4,8	5,5	6,2
160	0,8	1,7	2,6	3,5	4,4	5,3	6,1	7,0	7,9
180	1,0	2,1	3,2	4,3	5,4	6,5	7,6	8,7	9,8
200	1,2	2,5	3,8	5,2	6,5	7,8	9,2	10,6	11,9
220	1,4	3,0	4,6	6,2	7,8	9,4	11,0	12,6	14,2
240	1,7	3,6	5,4	7,3	9,2	11,1	12,9	14,8	16,7
180	2,0	4,1	6,2	8,5	10,7	12,8	15,0	17,2	19,3
180	2,2	4,7	7,0	9,7	12,3	14,7	17,2	19,7	22,2
180	2,6	5,4	8,1	11,1	13,8	16,8	19,6	22,5	25,3
200	2,9	6,1	9,3	12,5	15,7	19,3	22,2	25,4	28,8
210	3,2	6,8	10,3	14,1	17,7	21,3	24,9	28,5	32,1
220	3,6	7,6	11,7	15,7	19,7	23,7	27,7	31,7	35,7
230	4,0	8,5	12,9	17,4	21,9	26,3	30,7	35,2	39,7
240	4,4	9,3	14,3	19,2	24,1	29,0	33,9	38,9	43,7
250	4,9	10,3	15,8	21,0	26,4	31,8	37,2	42,6	48,0
260	5,3	11,2	17,1	23,0	28,3	34,9	40,7	46,6	52,5
270	5,8	12,2	18,6	25,1	30,5	37,9	44,3	50,8	57,2
280	6,3	13,3	20,2	27,2	34,2	41,2	48,1	55,1	62,1
290	6,8	14,3	21,8	29,4	37,9	44,5	52,1	59,6	67,2
300	7,3	15,4	23,5	31,7	39,9	48,0	56,2	64,3	72,5

rzystaniem tabel sprowadzają się do sprawdzenia jednej z dwóch nierówności:

$$M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi} \text{ w stosunku do sytuacji wyjątkowej;}$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \text{ w stosunku do sytuacji normalnej.}$$

Najprościej zobrazować to przykładem. Wymiary belki 120/200 mm, rozpiętość 4 m i rozstaw co 0,6 m. Obciążenia stałe działające na belkę 1,44 kN/m, obciążenia zmienne dla pomieszczenia o kategorii C1 przyjęto 3 kN/m². Drewno sosnowe klasy C27. Wymagany czas odporności ogniowej 30 min. Klasa użytkowania I ($k_{mod,sre} = 0,8$; $k_{def} = 0,6$).

Kombinacje oddziaływań:

$$G_k = 1,44 \text{ kN/m; } Q_k = 3 \text{ kN/m}^2 \cdot a = 3 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} = 1,8 \text{ kN/m}$$

Sytuacja normalna:

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 1,35 \cdot 1,44 + 1,5 \cdot 1,8 = 4,64 \text{ kN/m; } 100\%$$

Sytuacja pożarowa:

$$E_{d,fi} = G_k + \psi_{2,1} Q_k = 1,44 + 0,6 \cdot 1,8 = 2,52 \text{ kN/m; } 54\%$$

Sytuacja pożarowa uproszczona:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d = 0,6 \cdot 4,64 = 2,78 \text{ kN/m; } 60\%$$

Sytuacja normalna

$$M_{Ed} = \frac{E_d \cdot L^2}{8} = \frac{4,64 \cdot 4^2}{8} = 9,28 \text{ kNm}$$

Sytuacja wyjątkowa przy użyciu tablic:

$$M_{Ed,fi} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,6 \cdot 9,28 = 5,56 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie momentu zginającego w odniesieniu do sytuacji wyjątkowej:

$$M_{Ed,fi} = 5,56 \text{ kNm} \leq 9,32 \text{ kNm} = M_{Rd,fi}$$

Dopuszczalny moment zginający można również sprawdzić w drugi sposób, w odniesieniu do sytuacji normalnej:

$$M_{Rd} = M_{Rd,fi} / 0,7 = 9,32 / 0,7 = 13,31 \text{ kNm;}$$

$$M_{Rd} = 9,28 \text{ kNm} \leq 13,31 \text{ kNm} = M_{Rd}$$

W celu oszacowania momentu zginającego w odniesieniu do sytuacji wyjątkowej wystarczy pomnożyć współczynnik redukcyjny η_{fi} (zalecany 0,6) przez wartość momentu zginającego dla efektu oddziaływań w sytuacji normalnej. Jest to metoda uproszczona, zalecana przez normę [8]. Stosując metodę szczegółową dla kombinacji efektu oddziaływań w sytuacji wyjątkowej, należy zastąpić współczynnik redukcyjny η_{fi} otrzymaną wartością obliczeniową, szczegółowej kombinacji oddziaływań $E_{d,fi}$ (w powyższym przypadku 54%).

Alternatywą dla tabel nośności są wykresy maksymalnych momentów zginających dotyczących sytuacji wyjątkowej. Metoda tabelaryczna jest dokładniejsza, jednak z uwagi na możliwość wystąpienia różnych przekrojów, wykresy nośności mogą stać się praktycznym narzędziem do prawidłowego szacowania nośności belek drewnianych w przypadku odpowiedniej odporności ogniowej. Na rysunku 1 przedstawiono sprawdzenie maksymalnego momentu zginającego w sytuacji wyjątkowej na przykładzie wykresu.

Sprawdzenie momentu zginającego, w odniesieniu do sytuacji wyjątkowej:

$$M_{Ed,fi} = 5,56 \text{ kNm} \leq 9,2 \text{ kNm} = M_{Rd,fi}$$

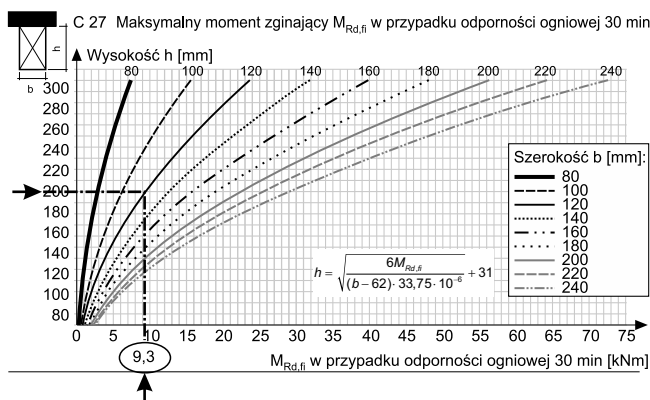
Sprawdzenie momentu zginającego, w odniesieniu do sytuacji normalnej:

$$M_{Rd} = M_{Ed,fi} / 0,7 = 9,2 / 0,7 = 13,14 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 9,28 \text{ kNm} \leq 13,14 \text{ kNm} = M_{Rd}$$

Wzory do wyznaczenia $M_{Rd,fi}$ [kNm], h [mm] oraz b [mm] w przypadku belki narażonej na działanie ognia z trzech lub czterech stron przyjęte w obliczeniach pokazano w tabeli 2, a w tabeli 3 efektywną głębokość zwęglenia d_{ef} .

Nomogramy nośności dla wybranych klas drewna litego przedstawiono na rysunkach 2 ÷ 7.



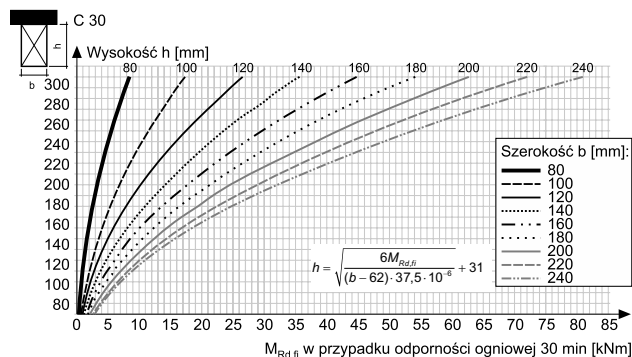
Rys. 1. Wyznaczanie maksymalnego momentu zginającego $M_{Rd,fi}$ za pomocą wykresu [Źródło: opracowanie własne]

Tabela 2. Ogólne wzory dla $M_{Rd,fi}$, h , b , na podstawie [3]

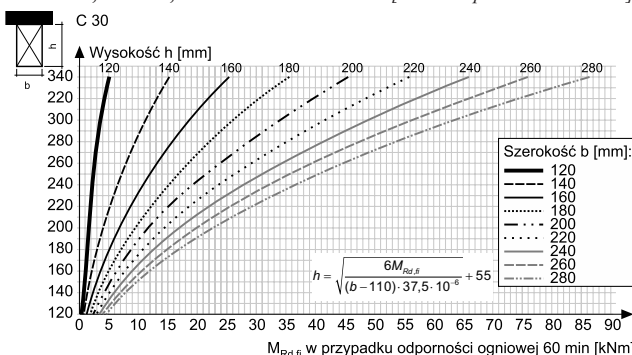
Liczba stron narażonych na działanie ognia	
3 strony	4 strony
$h = \sqrt{\frac{6M_{Rd,fi}}{(b-2d_{ef}) \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}} + d_{ef}}$	$h = \sqrt{\frac{6M_{Rd,fi}}{(b-2d_{ef}) \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}} + 2d_{ef}}$
$M_{Rd,fi} = \frac{(b-2d_{ef}) \cdot (h-d_{ef})^2 \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}}{6}$	$M_{Rd,fi} = \frac{(b-2d_{ef}) \cdot (h-2d_{ef})^2 \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}}{6}$
$b = \frac{M_{Rd,fi} \cdot 6}{(h-d_{ef})^2 \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}} + 2d_{ef}$	$b = \frac{M_{Rd,fi} \cdot 6}{(h-2d_{ef})^2 \cdot f_{m,20} \cdot 10^{-6}} + 2d_{ef}$

Tabela 3. Efektywna głębokość zwęglenia d_{ef} wg [8]

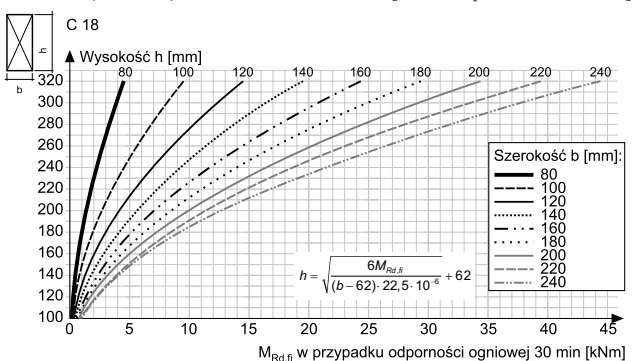
Rodzaj drewna	Efektywna głębokość zwęglenia d_{ef} [mm]	
	30 min	60 min
Drewno lite C 14-40	31	55
Drewno klejone warstwowo GL 24-40	28	49



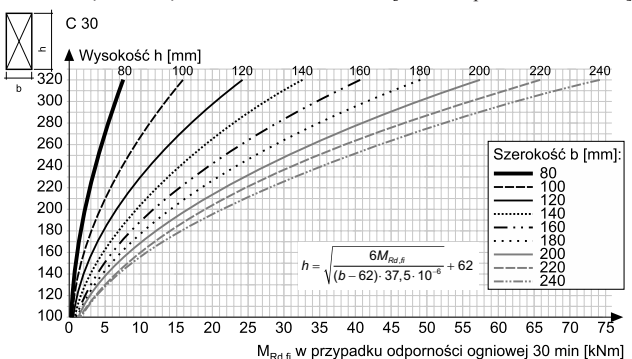
Rys. 2. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 3 stron, 30 min, C30 [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 3. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 3 stron, 60 min, C30 [Źródło: opracowanie własne]



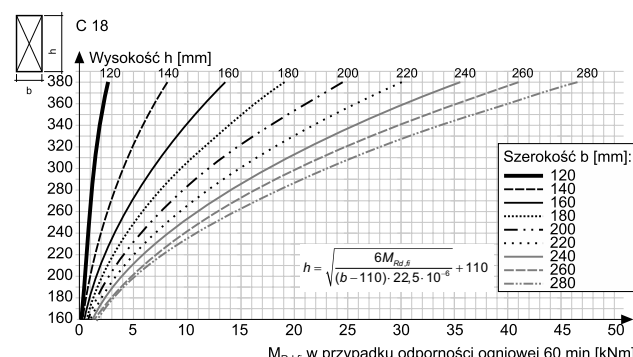
Rys. 4. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 4 stron, 30 min, C18 [Źródło: opracowanie własne]



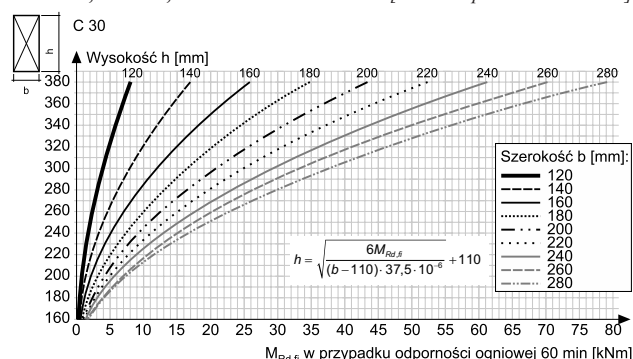
Rys. 5. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 4 stron, 30 min, C30 [Źródło: opracowanie własne]

Podsumowanie

Przedstawione w artykule wybrane nomogramy pozwalające wyznaczyć maksymalny moment zginający drewnianych belek zginanych, o różnej klasie wytrzymałości drewna, poddanych działaniu ognia z trzech lub czterech stron, przez 30 lub 60 min, mają stanowić pomost pomiędzy projektantem, konstruktorem a rzeczoznawcą ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych, pozwalając temu drugiemu, bez wchodzenia w szczegóły związane z wymiarowaniem konstrukcji, oszacować na obiekcie nośność zginanego elementu w sytuacji pożarowej.



Rys. 6. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 4 stron, 60 min, C18 [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 7. Maksymalny moment zginający $M_{Rd,fi}$ działanie ognia z 4 stron, 60 min, C30 [Źródło: opracowanie własne]

Artykuł powstał na podstawie pracy dyplomowej obronionej przez współautora w SGSP w Warszawie. W pracy dyplomowej zamieszczono tabele i nomogramy zarówno dla belek (elementy zginane, działanie ognia z 3 i 4 stron), jak i nieomówionych w tym artykule słupów (elementy ściskane, działanie ognia z 4 stron) wykonanych z klas drewna litego C14-C40 i klejonego GL24-GL40 oraz czasu oddziaływania ognia 30 i 60 min.

Artykuł powstał na podstawie pracy dyplomowej obronionej przez współautora w SGSP w Warszawie. W pracy dyplomowej zamieszczono tabele i nomogramy zarówno dla belek (elementy zginane, działanie ognia z 3 i 4 stron), jak i nieomówionych w tym artykule słupów (elementy ściskane, działanie ognia z 4 stron) wykonanych z klas drewna litego C14-C40 i klejonego GL24-GL40 oraz czasu oddziaływania ognia 30 i 60 min.

Literatura

- [1] Porteous J., Kermani A., Structural Timber Design to Eurocode 5, Blackwell Publishing 2007.
- [2] Adamski R., Określenie nośności ogniowej elementów konstrukcji drewnianych zgodnie z Eurokodem 5-1-2, „Materiały Budowlane” 2004, nr 3, s. 61 – 63, 96.
- [3] Kram D., Projektowanie obiektów drewnianych z uwzględnieniem wymagań w zakresie odporności ogniowej, „Czasopismo Techniczne” 2007/Kraków, z. 4-A, s. 295 – 300.
- [4] Sulik P., Odporność ogniowa konstrukcji drewnianych, „Ochrona Przeciwpożarowa” 2007, nr 4/07, s. 12 – 13.
- [5] Sulik P., Odporność ogniowa konstrukcji drewnianych, „Ochrona Przeciwpożarowa” 2008, nr 1/08, s. 2 – 5.
- [6] Nowak T., Wpływ smukłości przekrojów zginanych elementów z drewna klejonego warstwowo na nośność w warunkach pożaru, „Materiały Budowlane”, w przygotowaniu do druku.
- [7] PN-EN 1995-1-1, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.
- [8] PN-EN 1995-1-2, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-2: Postanowienia ogólne. Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.