

## **PRĘDKOŚĆ ZWĘGLANIA DREWNA W ANALIZIE POŻAROWEJ KONSTRUKCJI DREWNIANYCH**

Anna DĘBOWSKA

Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, Opole, Polska

**Słowa kluczowe:** *pożar, konstrukcje drewniane, prędkość zwęglania, odporność ogniowa.*

### **1. Wprowadzenie**

Podstawowe znaczenie, z punktu widzenia pożarowej analizy elementów konstrukcji drewnianych, ma prędkość i głębokość zwęglania drewna. Wynikiem spalania jest tworzenie się na powierzchni elementu drewnianego zwęglonej warstwy o dobrych parametrach izolacyjnych, lecz nie wykazującej praktycznie żadnej wytrzymałości i sztywności. O nośności elementu drewnianego decyduje pozostały, niezwęglony rdzeń przekroju. Dodatkowym, niekorzystnym zjawiskiem towarzyszącym jest powstawanie na powierzchni warstwy węgla głębokich pęknięć pozwalających na głębszą penetrację promieniowania termicznego w głąb tej warstwy, jak również odpryskiwanie części zwęglonej warstwy przyczyniające się do znacznego wahanja jej grubości i zmniejszenia zawartości wilgoci w drewnie. Parametrem pozwalającym opisać zachowanie drewna w trakcie spalania w warunkach pożarowych jest prędkość spalania, opisywana w literaturze poprzez różne modele pół-empiryczne. Duże różnice w otrzymanywanych wynikach utrudniają ujednoczenie i normalizację procedury obliczeniowej, dlatego w niniejszej pracy podjęto próbę usystematyzowania najczęściej spotykanych modeli oraz wskazania kierunku dalszych badań w tym zakresie, np. poprzez zastosowanie teorii ośrodków porowatych w podwyższonej temperaturze [5].

### **2. Prędkość zwęglania**

Prędkość zwęglania  $\beta$  powierzchni drewna zależy od szeregu czynników – gatunku drewna, jego gęstości i wilgotności, czasu nagrzewania, wielkości i kierunku działania strumienia ciepła, stężenia tlenu. Stosowanie stałych prędkości zwęglania, jakkolwiek wygodne, nie odzwierciedla rzeczywistego zjawiska. Przyjmowanie różnych modeli zwęglania w procedurze obliczeniowej prowadzi do znacznych różnic w obliczanej grubości zwęglonej warstwy, a o nośności elementu w dużej mierze decyduje pozostały niezwęglony rdzeń. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku elementów o smukłych przekrojach poprzecznych.

Dotychczas przeprowadzono wiele badań celem opracowania modeli opisujących prędkość zwęglania drewna i ustalenia czynników wpływających na ten proces. Przedstawiane w literaturze modele zwęglania drewna ujmują różne czynniki wpływające na

prędkość zwęglania. Przydatność stosowania danego modelu wynika z rodzaju zawartych w nim parametrów i możliwości jego dostosowania do właściwości materiału i warunków termicznych.

W dalszej części opracowania porównano wyniki prędkości zwęglania uzyskane w oparciu o prezentowane w literaturze modele znajdujące zastosowanie w przypadku popularnego w Polsce drewna sosnowego. Przeanalizowane modele zwęglania ujmują podstawowe parametry, jak: gatunek (sosna), wilgotność ( $\omega = 12\%$ ) i gęstość ( $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{\text{dry}} = 490 \text{ kg/m}^3$ ) oraz parametry dodatkowe opisane w danym ujęciu zagadnienia.

Model zaproponowany przez Babrauskas'a [1] w postaci

$$\beta = 113 k_{\text{O}_2} \frac{(q'')^{0,5}}{\rho t^{0,3}}, \quad (1)$$

uwzględnia gęstość  $\rho$ , stężenie tlenu ( $k_{\text{O}_2}=0,8$  przy założeniu stężenia na poziomie 8-10%), strumień ciepła ( $q''=92 \text{ kW/m}^2$ ) i czas nagrzewania  $t$ .

Prędkość zwęglania przy uwzględnieniu gęstości drewna  $\rho$  i czasu nagrzewania  $t$  elementu wg modelu proponowanego przez Gardner'a i Syme'a [1] opisuje wyrażenie

$$\beta = \frac{413}{\rho} + \frac{1,6}{t}. \quad (2)$$

Z kolei model przedstawiony w Technical Report No. 10 „Calculating the Fire Resistance of Exposed Wood Members” [3], opracowany przez White'a, zakłada zwiększenie prędkości zwęglania celem uwzględnienia redukcji wytrzymałości i sztywności drewna bezpośrednio w sąsiedztwie warstwy zwęglonej i ma postać

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{1,638}{t^{0,187}}. \quad (3)$$

Inny model, zaproponowany przez Schaffer'a [4], uwzględnia gęstość drewna wysuszonego  $\rho_{\text{dry}}$  i zawartość wilgoci  $\omega$  w drewnie. Prędkość zwęglania wg tego modelu opisuje równanie

$$\beta = \frac{12,7}{[(5,832+0,12\omega)\rho_{\text{dry}} \cdot 10^{-3} + 12,862]}. \quad (4)$$

White i Nordheim [7] wzięli pod uwagę, podobnie jak Schaffer, gęstość drewna i zawartość wilgoci. Ponadto wprowadzili do modelu współczynnik skurczu warstwy zwęglonej ( $f_c=0,59$ ) oraz współczynnik gatunku drewna ( $Z_1=0,005$ ), uzyskując równanie postaci

$$\beta = 0,1526 + 0,508\rho_{\text{dry}} \cdot 10^{-3} + 0,1475f_c + Z_1\omega. \quad (5)$$

Natomiast zgodnie z Eurokodem 5 [6] wartość prędkości zwęglania różnicowana jest w zależności od rodzaju drewna, jego gęstości i przyjętej metody obliczeniowej (zwęglanie jedno- lub dwukierunkowe), zawierając się w przedziale:

$$\beta = (0,5 \div 0,8) \text{ mm/min}. \quad (6)$$

Cachim i Franssen [2] zaproponowali model bazujący na prędkościach zwęglania podanych w Eurokodzie 5 [6]. Punktem wyjścia była prędkość zwęglania drewna o gęstości 450 kg/m<sup>3</sup> i wilgotności 12 %. W przypadku drewna o innej gęstości i wilgotności autorzy proponują następującą formułę obliczeniową

$$\beta_{\rho,\omega} = \sqrt{\frac{450}{\rho_{12}}} \cdot \left(\frac{1,12}{1+\omega}\right)^{1,5} \cdot \beta_{450,12} \quad (7)$$

Przedstawione modele znajdują zastosowanie w przypadku zwęglania 1-kierunkowego (Schaffer, Babrauskas, White i Nordheim, Eurokod 5) lub 2-kierunkowego (Eurokod 5, American Wood Council [3]). Należy wspomnieć w tym miejscu, że modele zwęglania 1-kierunkowego nie uwzględniają wyokrąglenia naroży przekroju w przeciwieństwie do modeli zwęglania 2-kierunkowego.

### 3. Wyniki obliczeń

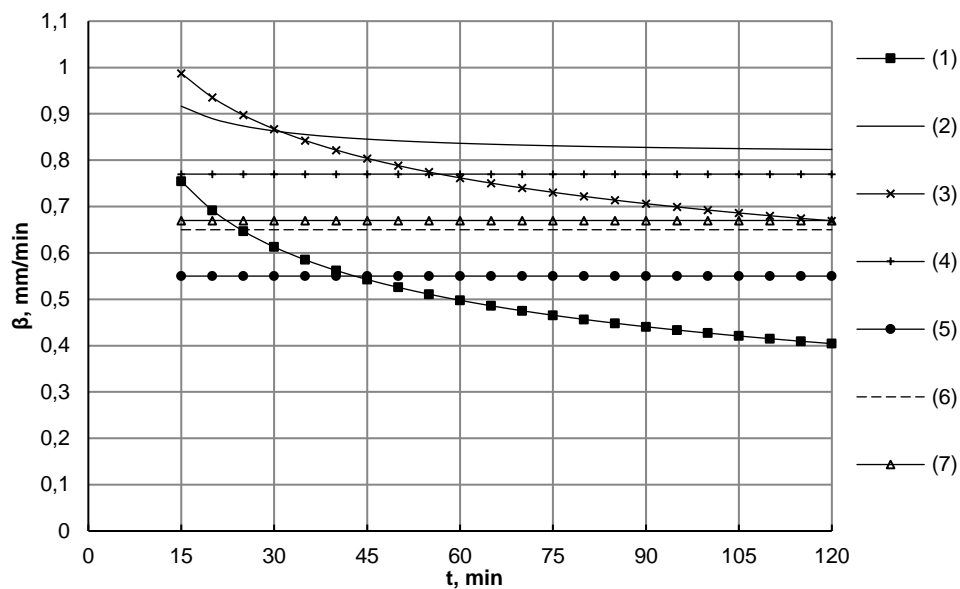
W tabelicy 1 zamieszczono wartości prędkości zwęglania drewna sosnowego wyliczone w oparciu o modele opisane w punkcie 2. Wykres na rys. 1 obrazuje wyniki przedstawione w tabelicy 1. Przyjęte na wykresie oznaczenia (od 1 do 7) odnoszą się do numeracji wzorów poszczególnych modeli zwęglania. Prędkość zwęglania wyznaczona w oparciu o wzory (1), (2) i (3) zmienia się w czasie – początkowo jest dosyć wysoka, ale z upływem czasu maleje. Można tłumaczyć to tworzeniem się zwęglonej warstwy, która działa izolująco. Niemniej różnice w uzyskanych wartościach są znaczne, zatem nie bez znaczenia jest dobór modelu zwęglania w analizie pożarowej elementu drewnianego.

Tabela 1. Wartości prędkości zwęglania drewna sosnowego

Czas <i>t</i> [min]	Prędkość zwęglania $\beta$ [mm/min] wg wzoru:						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<b>15</b>	0,754	0,917	0,987	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>30</b>	0,613	0,863	0,867	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>45</b>	0,543	0,845	0,804	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>60</b>	0,498	0,836	0,762	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>75</b>	0,466	0,831	0,731	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>90</b>	0,441	0,828	0,706	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>105</b>	0,421	0,825	0,686	0,77	0,55	0,65	0,67
<b>120</b>	0,404	0,823	0,669	0,77	0,55	0,65	0,67

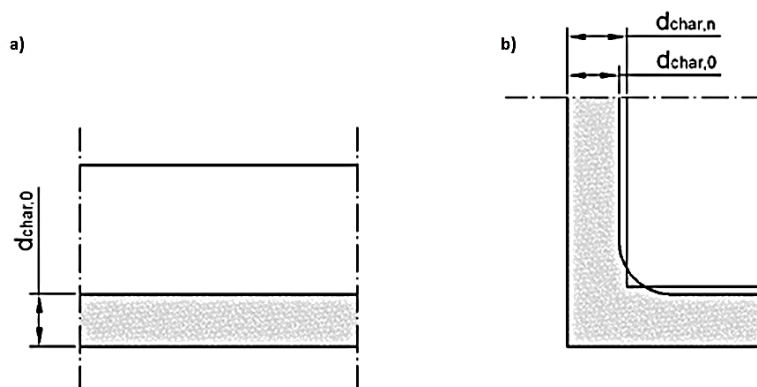
Z analizy wyników badań ogniowych zamieszczonych w literaturze [4,8,9] wynika, że prędkość zwęglania drewna sosnowego wynosi od 0,5 mm/min do 0,94 mm/min, zależnie od gęstości, zawartości wilgoci, ekspozycji ogniowej, kształtu i wielkości przekroju poprzecznego, strumienia ciepła, zawartość tlenu itp. Dlatego wyniki tych badań są trudne do porównywania. Szeroki rozrzut wyników badań i obliczonych prędkości zwęglania wskazuje na potrzebę dalszych prac nad modelem zwęglania przydatnym do wykorzystania w projektowaniu z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe. Jest to zagadnienie ważne, ponieważ przyjęta w procesie projektowania prędkość zwęglania drewna wpłynie na grubość zwęglonej warstwy  $d_{char}$  (rys. 2) redukującej wymiary przenoszącego obciążenia rdzenia

przekroju drewnianego, a przez to wpływająca istotnie na zmianę sztywności i nośności przekroju.



Rys. 1. Zmiana prędkości zwęglania drewna sosnowego w czasie (1- Babrauskas, 2- Gardner i Syme, 3- White, 4- Schaffer, 5- White i Nordheim, 6- Eurokod 5, 7- Cachim i Franssen)

Fig. 1. Time-changes of charring rate of pine wood



Rys. 2. Zwęglanie przekroju drewnianego: a) jednokierunkowe, b) dwukierunkowe [6]  
Fig. 2. Charring of timber cross-section: a) one-dimensional, b) two-dimensional [6]

## 4. Podsumowanie

Literatura przedmiotu jest dosyć obszerna, jednak z jej analizy wynika ciągła potrzeba pracy nad modelami, zarówno badawczymi, jak i obliczeniowymi, dającymi możliwość porównywania wyników badań prowadzonych w różnych ośrodkach, a przede wszystkim wykorzystania w projektowaniu konstrukcji.

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że na prędkość zwęglania drewna ma wpływ szereg parametrów: gatunek, gęstość, zawartość wilgoci, strumień ciepła, stężenie tlenu, czas trwania pożaru, kierunek działania ognia, wymiary przekroju elementu. Prowadzone badania są jednak bardzo zróżnicowane, dlatego też wyniki są często trudne do porównywania. Z tego powodu podawane w literaturze modele często ograniczają się do wąskiego zakresu parametrów, co utrudnia ich szersze zastosowanie i wykorzystanie zarówno w badaniach, jak i w projektowaniu. Ze względu na porowatą strukturę drewna, model fizyczny zjawiska, pozwalający na przeprowadzenie symulacji numerycznych, powinien obejmować złożone, sprzężone przepływy ciepła i masy w ośrodku porowatym.

Prędkość zwęglania drewna wpływa na grubość tworzącej się zwęglonej warstwy. Model tworzenia się tej warstwy powinien uwzględniać wskazane w badaniach ogniowych parametry wpływające na prędkość zwęglania, ale jednocześnie jego formuła powinna dawać możliwość praktycznego wykorzystania w przypadku różnych przypadków projektowych.

### Oznaczenia symboli

- $d_{char,0}$  - głębokość zwęglania jednokierunkowego, one-dimensional charring depth, [mm]
- $d_{char,n}$  - głębokość zwęglania dwukierunkowego, two-dimensional charring depth, [mm]
- $f_c$  - współczynnik skurczu warstwy zwęglonej, charring contraction factor, [-],
- $k_{O_2}$  - współczynnik stężenia tlenu, coefficient for oxygen concentration, [-],
- $q''$  - strumień ciepła, heat flux, [kW/m<sup>2</sup>],
- $t$  - czas, time, [min],
- $Z_1$  - współczynnik gatunku drewna, species-specific coefficient, [-],
- $\beta$  - prędkość zwęglania, charring rate, [mm/min],
- $\beta_{eff}$  - efektywna prędkość zwęglania, effective charring rate, [mm/min],
- $\beta_{\rho,\omega}$  - prędkość zwęglania drewna o gęstości  $\rho$  i zawartości wilgoci  $\omega$ , charring rate of wood with density  $\rho$  and moisture content  $\omega$ , [mm/min],
- $\beta_{450,12}$  - prędkość zwęglania drewna dla  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ ,  $\omega = 12\%$ , charring rate of wood for  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ ,  $\omega = 12\%$ , [mm/min],
- $\rho$  - gęstość, density, [kg/m<sup>3</sup>],
- $\rho_{dry}$  - gęstość drewna suchego, density of dry wood, [kg/m<sup>3</sup>],
- $\rho_{12}$  - gęstość drewna o wilgotności 12%, density of wood with moisture content 12%, [kg/m<sup>3</sup>],
- $\omega$  - zawartość wilgoci, moisture content, [%].

### Literatura

- [1] Babrauskas V., Charring rate of wood as a tool for fire investigations, Fire Safety Journal, 40, 6, 528-554, 2005
- [2] Cachim P. B., Franssen J. M., Assessment of Eurocode 5 Charring Rate Calculation Methods, Fire Technology, 46, 169-181, 2010

- [3] Calculating the Fire Resistance of Exposed Wood Members. Technical Report 10. American Wood Council. American Forest & Paper Association, Inc., Washington, 2015
- [4] Friquin K. L., Charring rates of heavy timber structures for Fire Safety Design, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim, 2010
- [5] Gawin D., Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych, ZN 853, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.
- [6] PN-EN 1995-1-2 Eurokod 5, Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-2 Postanowienia ogólne. Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.
- [7] White R. H., Nordheim E. V., Charring Rate of Wood for ASTM E119 Exposure, Fire Technology, 28, 1, 5-30, 1992
- [8] White R. H., Tran H. C., Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Heat Flux, The 3rd International Scientific Conference: Wood & Fire Safety, Technical University of Zvolen, Faculty of Wood Technology, Slovak Republic, 175-183, 1996
- [9] Yang T. H. et al., The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test, Building and Environment, 44, 231-236, 2009

## **CHARRING RATE OF WOOD IN THE FIRE ANALYSIS OF TIMBER STRUCTURES**

### **Summary**

Intensive heating of elements of timber structures in the fire leads to the damage of these structures. Wood is a combustible material and the thickness of the charred layer influences on the shape and dimensions of the cross-section. The paper deals with charring rate of wood as an important parameter in fire resistance of timber structures. The change of charring rate depend on the various properties and factors (density, moisture content, time, heat flux), therefore more research should be carried out to determine a calculation models for the charring rate of wood.