

dr inż. Paweł Sulik<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-8050-8194

mgr inż. Michał Rykaczewski<sup>2)</sup>

ORCID: 0009-0008-3128-5201

# Wpływ impregnacji na prędkość zwęglania drewna klejonego krzyżowo

## *Effect of impregnation on the charring rate of cross-laminated timber*

DOI: 10.15199/33.2024.05.04

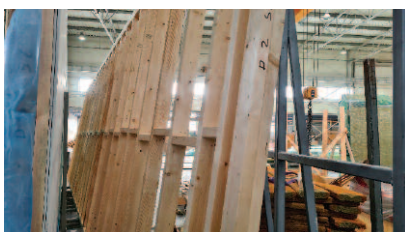
**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badania prędkości zwęglania próbek z drewna klejonego krzyżowo (*Cross-laminated timber*, CLT), wykonanych w warunkach symulujących produkcję przemysłową. Zewnętrzne warstwy wykonano z trzech rodzajów drewna impregnowanego ogniochronnie – sosny twardej, sosny bielastej oraz topoli. Wyniki porównano z próbkami nieimpregnowanymi w celu określenia wpływu impregnacji zmniejszającej palność materiału na prędkość zwęglania. Do impregnacji zastosowano solny impregnat ogniochronny dostępny na rynku komercyjnym.

**Słowa kluczowe:** drewno klejone; CLT; impregnacja ogniochronna; prędkość zwęglania.

**Abstract.** This paper presents the results of charring rate testing of cross-laminated timber (CLT) samples made under conditions simulating industrial production. The outer layers were made from 3 types of fire-impregnated timber – heartwood pine, sapwood pine and poplar. The results were compared with unimpregnated samples in order to determine the effect of the flame retardant impregnation on the charring rate of the material. Salt based fire retardant available on the commercial market was used for impregnation.

**Keywords:** laminated wood; CLT; fireproofing; charring rate.

Drewno ze względu na wymiary pozyskiwanego naturalnego surowca, konieczność wyeliminowania wad oraz spełnienia wymagań konstrukcyjnych, np. związanych z wymiarami niezbędnymi do przeniesienia obciążeń, podlega procesowi klejenia w uprzemysłowionych wytwórniach konstrukcyjnych elementów drewnianych. Stopień klejenia jest zróżnicowany i do najpopularniejszych grup zaliczamy drewno klejone na złącza klinowe wg normy EN 15497:2014, które pozwala na uzyskiwanie elementów o dowolnej długości, bez widocznych wad, o typowych przekrojach stosowanych w budownictwie szkieletowym, np. 50 × 120 mm, 60 × 180 mm, itp. (fotografia 1). Druga grupa to typowe drewno klejone warstwowo spełniające kryteria normy EN 14080:2013, umożliwiające uzyskiwanie dowolnych wymiarów poprzecznych elementów liniowych typu belki, podciąg, dźwigary dachowe czy słupy (fotografia 2). Trzecią grupę stanowią elementy powierzchniowe wykonane w technologii CLT (*Cross-laminated timber*), która od czasu jej rozpowszechnienia [1] stała się



Fot. 1. Typowe elementy w konstrukcji szkieletowej  
Photo 1. Typical elements of wooden frame structures



Fot. 2. Typowe elementy z drewna klejonego warstwowo  
Photo 2. Typical elements made of glued laminated timber

najszybciej rozwijającą się technologią wykorzystującą drewno klejone na świecie. W 2022 r. istniały w Europie 53 fabryki CLT i planowano otwarcie kolejnych 16. W pozostałej części świata istniało w tym czasie 27 fabryk, a w planach było uruchomienie kolejnych dziesięciu. Dynamika produkcji bardzo przyspieszyła i obecnie wytwarza się na świecie ok. 3 mln m<sup>3</sup> drewna klejonego (rysunek 1).

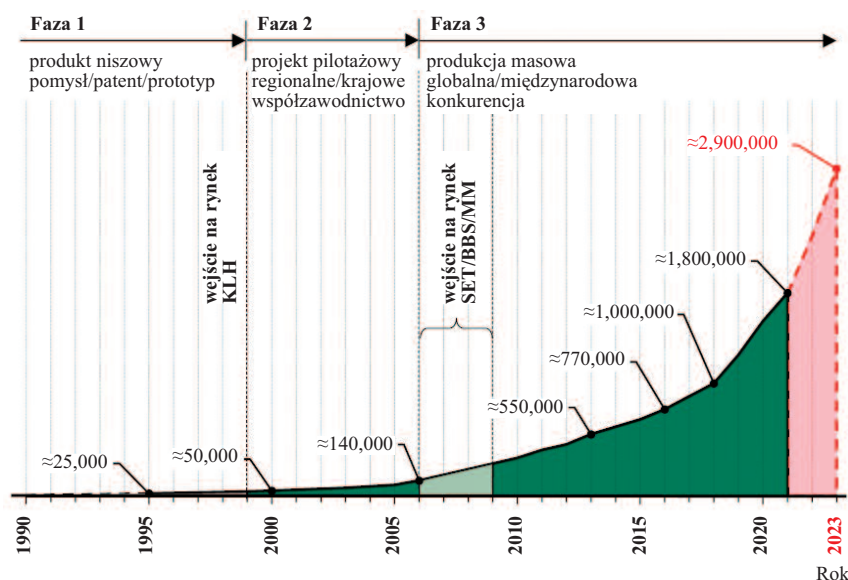
Szybki rozwój budownictwa drewnianego w wielu krajach wynika przede wszystkim z tradycji oraz lokalnych źró-

deł surowcowych, jak również odpowiednich przepisów umożliwiających stosowanie tych technologii, nie tylko w budynkach niskich, najczęściej jednoczyni dwukondygnacyjnych, ale także w wielokondygnacyjnych o różnym przeznaczeniu. W Szwecji np. zmiany legislacyjne wprowadzono już w latach dziewięćdziesiątych XX w., co przyczyniło się do powszechnego wykorzystania drewna klejonego w budownictwie. Kluczowym elementem była ocena zagrożeń pożarowych, które również

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej

<sup>2)</sup> Polskie Domy Drewniane SA

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: p.sulik@itb.pl



**Rys. 1. Fazy wprowadzania i wolumen produkcji drewna CLT na świecie wg G. Schickhofer, R. Brandner, A. Ringhofer, D. Glasner, M. Gstettner z Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology**  
 Fig. 1. Development phases and volume of CLT wood production in the world according to G. Schickhofer, R. Brandner, A. Ringhofer, D. Glasner, M. Gstettner from the Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology

w Polsce stanowią podstawową barierę dla większego wykorzystania drewna w budownictwie. Problem palności drewna jest jednakowy w całej Europie, natomiast w polskich wymaganiach dotyczących budynków [2] stawiane są dodatkowe obostrzenia związane z rozprzestrzenianiem ognia, które w wielu europejskich krajach nie obowiązują.

Drewno bez badań klasyfikuje się w klasie reakcji na ogień D-s2, d0, natomiast wymagania stawiane w warunkach technicznych [2], w celu uzyskania cechy nierozprzestrzeniania ognia, przewidują do zastosowania wewnątrz obiektu co najmniej klasy B-s3, d0. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy w przypadku budynków ZL (zagrożenia ludzi) ograniczenie zadymienia, niezbędne do prawidłowej ewakuacji oraz prowadzenia akcji ratowniczo-gaśniczej, to drewno powinno się charakteryzować klasą reakcji na ogień co najmniej B-s2, d0. Oznacza to potrzebę stosowania środków uniepalniających, najczęściej w formie impregnatów, a więc ingerencję środkami chemicznymi w zewnętrzną strukturę drewna. Pomimo istnienia na rynku środków przeznaczonych do zabezpieczania drewna, legitymujących się odpowiednimi dokumentami odniesienia, np. Krajową Oceną Techniczną, to należy podchodzić do tego typu zabezpieczeń bardzo roz-

ważnie i wnikliwie analizować zarówno dokumenty odniesienia, klasyfikacje ogniowe czy certyfikaty, jak również instrukcje aplikacji. W tego typu dokumentach istotna jest każda informacja o sposobie aplikacji, np. jeżeli jakiś środek jest przeznaczony do zabezpieczania drewna sosny i nie ma wzmianki o drewnie klejonym, to oznacza, że może być stosowany do drewna litego. Kolejnym istotnym elementem jest sposób aplikacji impregnatu – zapisy w instrukcji typu *impregnat należy nakładać dwu- lub trzykrotnie aż do naniesienia co najmniej 300 g/m<sup>2</sup>* oznaczają, że konieczne jest pokrywanie drewna impregnatem do momentu naniesienia odpowiedniej ilości środka – nawet jeżeli liczba warstw wyniesie kilkanaście lub kilkadziesiąt. Problem impregnacji zgodnej z wytycznymi producentów środków impregnujących dotyczy zarówno impregnacji w warunkach placu budowy, jak i zakładów przemysłowych, gdzie bardzo często proces technologiczny produkcji elementów z drewna klejonego wyklucza możliwość spełnienia wymagań instrukcji aplikacji uniepalniacza, nie wspominając już o innych formalnych wymaganiach, które powinny być spełnione, a nie są, jak wynika z praktyki.

Impregnacja ogniochronna zewnętrznych warstw drewna, oprócz oczekiwań dotyczących reakcji na ogień, może rów-

nież mieć wpływ na prędkość zwęglania drewna, co z kolei wpływa na nośność ogniową elementów. Badania prędkości zwęglania drewna niezabezpieczonego, w przypadku różnych gatunków botanicznych, prowadzone są w wielu ośrodkach od lat. Prekursorem tych badań był Schaffer (1967) i Hall (1970), ale w kolejnych latach sukcesywnie publikowano kolejne wyniki. Wśród opracowań zagranicznych z XXI wieku na uwagę zasługują prace White'a [3], Njankou i in. [4], Hugi i in. [5], Frangi i in. [6], Friquina i in. [7], Wena i in. [8]. W przypadku prac polskich autorów warto zwrócić uwagę na opracowania Dębowskiej [9] i Sulika [10]. Istnieją też prace przeglądowe, które w sposób usystematyzowany zestawiają archiwalne wyniki badań, np. Bartletta i in. [11]. Wyniki tych badań wskazują na istotne różnice pomiędzy poszczególnymi gatunkami botanicznymi lokalnie występujących gatunków drewna na świecie. Podobnie jest również w Polsce, gdzie drewno pozyskiwane jest z podobnych klimatycznie regionów, aczkolwiek z odmiennych krain przyrodniczo-leśnych. Zgodnie z dostępnymi danymi [12], w Polsce pod względem powierzchni występuje najwięcej drewna sosny zwyczajnej, która stanowi ~59% ogólnych zasobów leśnych. Miąższościowo jest to ~57%. Żaden inny gatunek nie przekracza 10%, przy czym najwięcej oprócz sosny mamy zasobów dębu, brzozy, buka czy olchy. W przypadku świerka i jodły, a więc drewna charakterystycznego dla CLT, to jedynie w województwie małopolskim jest to dominujący gatunek, a we wszystkich pozostałych występuje przede wszystkim sosna. Uwzględniając te uwarunkowania, lokalną dostępność surowca, wymagania przeciwpożarowe oraz politykę Europejskiego Zielonego Ładu, w artykule przedstawiono wyniki dotyczące dwóch rodzajów drewna o podobnych parametrach mechanicznych poddanych impregnacji ogniochronnej – sosny oraz topoli.

## Materiały i sposób wykonania próbek

Do badań jako warstwę impregnowaną wytypowano drewno sosny zwyczajnej z części twardej (utrudnione wnikanie impregnatu), sosny zwyczaj-

nej z części bielastej oraz drewno topoli. Kluczowym materiałem pozwalającym na odniesienie do stosowanej powszechnie klasy wytrzymałości drewna C24 jest drewno sosny twardej. Pozostałe rodzaje pełniły funkcję próbek kontrolnych pozwalających na porównanie wyników.

Do impregnacji zastosowano jednoskładnikowy, wodorozpuszczalny preparat solny, dostępny na polskim rynku, o substancji czynnej na bazie związków organicznych, w tym benzoesanów. Zgodnie z deklaracją producenta impregnat zmniejsza palności drewna do klasy reakcji na ogień B oraz jest dopuszczony do stosowania wewnątrz pomieszczeń, w których mogą przebywać ludzie.

Do badania prędkości zwęglania okładziny ogniochronnej w warunkach symulujących produkcję przemysłową wykonano 18 próbek CLT o wymiarach  $500 \times 500 \times 100$  mm. Połowa została wykonana jako nieimpregnowane próbki kontrolne – w celu oznaczenia wpływu impregnacji. Próbki zostały wykonane przez pracowników Wydziału Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0076/21-00.

Próbki wykonano z jednej warstwy impregnowanych elementów  $500 \times 100 \times 20$  oraz z dwóch warstw sosnowych elementów nieimpregnowanych  $500 \times 100 \times 40$ . Impregnowana przeciwogniowo warstwa o grubości 20 mm była wykonana z twardej części drewna sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.), bielastej części drewna sosny pospolitej oraz drewna topoli (*Populus Alba*). Wszystkie elementy przed klejeniem były strugane, odpylane i kondycjonowane do wilgotności 12–13%. Średnia gęstość drewna topolowego wynosiła  $487 \text{ kg/m}^3$ , a drewna sosnowego  $544 \text{ kg/m}^3$  i  $520 \text{ kg/m}^3$ , odpowiednio w przypadku części twardej i bielastej.

Impregnację zewnętrzną warstwy drewna sosny twardej przeprowadzono w podciśnieniu 0,8–0,9 bara przez 90 min. Elementy z drewna sosny bielastej i topoli impregnowano w podciśnieniu 0,8–0,9 bara do nasycenia impregnatem na poziomie  $40 \text{ kg/m}^3$  (tabela 1). Ze względu na konieczność wielokrotnej kontroli masy elementów i zmiany warunków przebiegu procesu impregnacji nie oznaczano czasu jej trwania.

**Tabela 1. Ilość naniesionego impregnatu ogniochronnego na zewnętrzne warstwy CLT**

*Table 1. Amount of fire retardant applied to external CLT layers*

L.p.	Retencja środka czynnego [ $\text{kg/m}^3$ ]		
	sosna twardej	topola	sosna bielasta
1	10,78	39,27	36,79
2	5,90	37,88	36,95
3	13,59	36,06	36,35
4	12,29	38,62	36,20
5	8,01	50,25	36,27
6	9,44	38,40	35,75
7	9,61	35,65	38,14
8	9,94	38,86	49,71
9	6,04	50,33	45,43
10	11,79	54,30	37,67
11	9,64	45,50	41,43
12	8,92	46,48	34,95
13	10,24	38,08	35,17
14	5,91	38,65	46,66
15	15,89	38,40	48,99
16	8,81	–	–
Średnia	9,80	41,78	39,76

Zgodnie z wytycznymi producenta środka impregnującego wymagane naniesienie substancji czynnej wynosi  $175 \text{ g/m}^2$  w przypadku impregnacji powierzchniowej lub  $40 \text{ kg/m}^3$  przy impregnacji ciśnieniowej (tabela 2). Po impregnacji elementy były suszone w temperaturze  $45^\circ\text{C}$  w suszarce laboratoryjnej.

Próbki sklejały z elementów o wilgotności 12–13% kontrolowanej za pomocą wilgotnościomierza młotkowego. Elementy o mniejszej wilgotności umieszczano w komorze klimatycznej do momentu uzyskania właściwej. Klej do drewna konstrukcyjnego typu PUR o czasie wiązania 175 min наносono na jedną warstwę drewna w ilości  $150 \text{ g/m}^2$  – zgodnie z wymaganiami

**Tabela 2. Zestawienie wykonanych próbek z podanym średnim i wymaganym naniesieniem impregnatu ogniochronnego**

*Table 2. Tested specimens with average and required application rate of flame retardant*

Próbki	Drewno warstwy impregnowanej	Czas impregnacji [min]	Osiągnięte naniesienie środka czynnego [ $\text{kg/m}^3$ ]	Naniesienie wymagane przez producenta [ $\text{kg/m}^3$ ]	Osiągnięte naniesienie środka czynnego [ $\text{g/m}^2$ ]	Naniesienie wymagane przez producenta [ $\text{g/m}^2$ ]
KS/1-3	sosna twardej	0	0	0	0	0
KB/1-3	sosna biel	0	0	0	0	0
KT/1-3	topola	0	0	0	0	0
BS/1-3	sosna twardej	90	9,8	40	81,67	175
BB/1-3	sosna biel	*	39,76	40	331,33	175
BT/1-3	topola	*	41,78	40	348,17	175

\*) Elementy z drewna sosny bielastej i topoli impregnowano w podciśnieniu 0,8–0,9 bara do nasycenia impregnatem na poziomie  $40 \text{ kg/m}^3$ . Ze względu na konieczność wielokrotnej kontroli masy elementów i zmiany warunków przebiegu procesu impregnacji nie oznaczano czasu jej trwania

producenta. Stronę bezklejową zwilżano wodą w ilości  $12 \text{ g/m}^2$ . Czas formowania płyty wynosił ok. 20 min.

Po naniesieniu kleju elementy prasowano z naciskiem nie mniejszym niż  $8 \text{ kg/cm}^2$  w prasie automatycznej (okresowe przyrosty co  $0,4 \text{ kg/cm}^2$ ). Czas prasowania wynosił minimum 180 min, a po jego zakończeniu i utwardzeniu spiny klejowej próbki formatowano do wymiarów  $500 \times 500 \pm 1$  mm.

Wykonane prace potwierdziły możliwość naniesienia impregnatu metodą podciśnieniową w ilości wymaganej przez producenta w przypadku drewna sosny bielastej oraz topoli. Spełnienie kryterium producenta dotyczy średniej wartości retencji środka czynnego dla wszystkich próbek w badanej partii. Zestawienie wyników naniesienia impregnatu poszczególnych próbek (tabela 1) pokazuje niższe retencje jednostkowe dla 66% próbek topoli i sosny bielastej. Wskazuje to na stosunkowo dużą zmienność wyników i potrzebę dalszych prac nad optymalizacją procesu impregnacji podciśnieniowej. Ze względu na brak przyjętych standardów w obszarze deklarowania parametru naniesienia środka ogniochronnego dobrą praktyką byłoby oznaczanie tego parametru jako 5% kwantylu naniesienia impregnatu w danej partii analogicznie do normatywnego oznaczania właściwości mechanicznych drewna [13]. Wykonywanie płyt CLT w warunkach symulujących produkcję pozwoliło na weryfikację możliwości aplikacji kleju typu PUR na impregnowane drewno. Nie zaobserwowano trudności w procesie klejenia i prasowania. Wyniki szacowania klasy reakcji na ogień metodą kalorymetru stożkowe-

go [14] próbek poddanych analogicznemu procesowi impregnacji zastosowanym środkiem wykazały zmniejszenie palności wszystkich rodzajów zastosowanego drewna do klasy C reakcji na ogień. Wartości wskaźników FIGRA 0,2MJ oraz THR wymagane dla klasy B reakcji na ogień zostały wypełnione w ok. 60% [15].

Wyniki wszystkich badanych próbek drewna zaimpregnowanego wskazywały na poprawę prognozowanej klasy reakcji na ogień w odniesieniu do drewna bez impregnacji. Na tej podstawie można ocenić, że zastosowany impregnat wpłynął na polepszenie właściwości ogniowych drewna. Zestawienie oszacowanych wartości parametrów klasyfikacyjnych [16] oraz klas reakcji na ogień przedstawiono w tabeli 3. W związku z tym, że parametr THR jest określany na podstawie pomiarów wykonywanych w pierwszych 10 min badania, licząc od momentu zapalenia źródła ognia, do dalszych badań przyjęto, że opóźnienie zapłonu oraz zmniejszenie intensywności spalania może spowodować zmniejszenie prędkości zwęglania drewna w badaniach odporności ogniowej.

## Metoda i wyniki badań

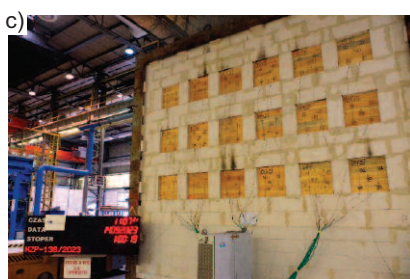
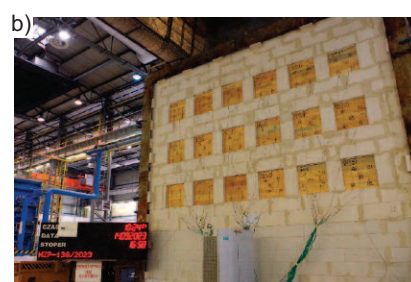
Badania przeprowadzono na specjalnie przygotowanej konstrukcji mocującej, wymurowanej z autoklawizowanego betonu komórkowego o grubości 24 cm, odmiany 600 kg/m<sup>3</sup>, w której wykonano specjalne otwory. W otworach zamocowano wcześniej przygoto-

wane próbki drewna CLT. Pomiędzy każdą warstwą drewna umieszczono termopary typu K, służące do pomiaru temperatury (fotografie 3 i 4).



Fot. 3. Próbkę podczas montażu  
Photo 3. Samples during assembly

Jako oddziaływanie ogniowe przyjęto krzywą standardową temperatura-czas, zakładając ciśnienie panujące w piecu +20 Pa na górnej krawędzi, najwyżej po-



Fot. 4. Próbkę przed badaniem odporności ogniowej (a) oraz w 17 min badania (b); w 61 min badania (c) i po 90 min badania odporności ogniowej (d)

Photo 4. Samples before the fire resistance test (a) and at 17 minutes of the test (b); in 61 minutes of the test (c); after 90 minutes of fire resistance test (d)

Tabela 3. Zestawienie szacowanej klasy reakcji na ogień wybranych gatunków drewna impregnowanych w podciśnieniu 0,8 – 0,9 bara

Table 3. Summary of the assessment of reaction to fire class of chosen wooden species impregnated by immersion in a vacuum of 0,8 – 0,9 bar

Drewno impregnowane	Retencja impregnatu – środek czynny [kg/m <sup>3</sup> ]	FIGRA [W/s]	FIGRA wymagany w przypadku klasy B [W/s]	Spełnienie kryterium FIGRA [%]	THR [MJ]	THR wymagany w przypadku klasy B [MJ]	Spełnienie kryterium THR [%]	Szacowana klasa reakcji na ogień [-]
Topola	39,40	182,65	120	66	10,6	7,5	71	C
Topola	39,40	157,53	120	76	11,4	7,5	66	C
Topola	39,40	160,11	120	75	11,9	7,5	63	C
Sosna twardełowa	13,06	194,59	120	62	14,7	7,5	51	C
Sosna twardełowa	13,06	176,67	120	68	15,4	7,5	49	C
Sosna twardełowa	13,06	186,06	120	64	14,2	7,5	53	C
Sosna bielasta	38,40	131,80	120	91	13,7	7,5	55	C
Sosna bielasta	38,40	141,07	120	85	13,9	7,5	54	C
Sosna bielasta	38,40	132,47	120	91	14,7	7,5	51	C

łożonych próbek, co odpowiadało ciśnieniu o wartości +5,6 Pa w punkcie pomiarowym. Badanie przeprowadzono w temperaturze otoczenia 22,2°C przy wilgotności względnej powietrza 68%. Jako graniczną wartość temperatury, w której rozpoczyna się proces zwęglania, przyjęto zgodnie z literaturą 300°C [3]. Czas rozpoczęcia zwęglania był określany, kiedy średnia temperatura z termopar położonych w tej samej warstwie osiągnęła wartość 300°C.

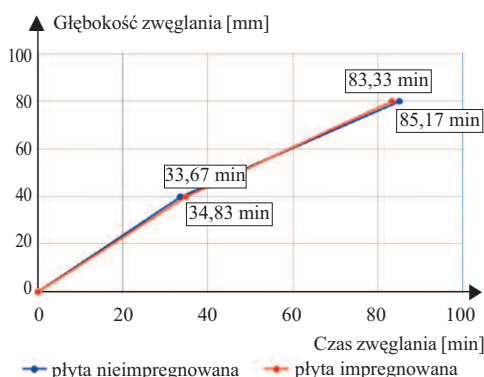
Wyniki badań zwęglania płyt z sosny twardełowej nieimpregnowanej i impregnowanej przedstawiono w tabelach 4 i 5 oraz na rysunku 2. Nie wykazały one istotnego wpływu impregnacji na zmniejszenie prędkości zwęglania. Powodem tego może być zbyt małe naniesienie środka impregnującego

Tabela 4. Wyniki zwęglania nieimpregnowanej płyty z sosny twardej  
Table 4. Charring results for non-impregnated heartwood pine panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka KS/1		próbka KS/2		próbka KS/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	38	39	31	30	34	30	33,67
80	81	88	87	91	84	80	85,17
100	–	–	–	–	–	–	–

Tabela 5. Wyniki zwęglania impregnowanej płyty z sosny twardej  
Table 5. Charring results for hardwood impregnated pine panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka BS/1		próbka BS/2		próbka BS/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	28	27,5	35	53	32,5	33	34,83
80	85	77	79,5	87,5	87	84	83,33
100	–	–	–	–	–	–	–



Rys. 2. Wykres zwęglania drewna sosny twardej: KS/1-3 – nieimpregnowane; BS/1-3 – impregnowane

Fig. 2. Charring diagram of heartwood pine wood: KS/1-3 – non-impregnated; BS/1-3 – impregnated

na drewno. Impregnacja metodą próżniową, bez przerw technologicznych na proces suszenia materiału między cyklami impregnacji, nie pozwoliła na naniesienie środka w ilości zgodnej z wymaganiami producenta.

Wyniki badań zwęglania drewna sosny bielastej impregnowanej i nieimpregnowanej (tabele 6 i 7 oraz rysunek 3) wykazały nieznaczny wpływ impregnacji na zmniejszenie prędkości zwęglania. W przypadku poszczególnych czasów zwęglania płyty impregnowane wykazały o ok. 5 mm mniejszą głębokość zwęglania od płyt nieimpregnowanych.

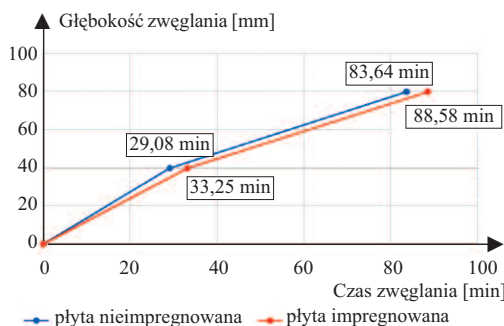
Impregnacja ogniochronna drewna topoli (tabele 8 i 9 oraz rysunek 4) wykazała znaczny wpływ na zmniejszenie prędkości zwęglania płyt CLT w pierwszych 60 min spalania. Głębokość zwęglania na poziomie 40 mm została spowolniona o ok. 14 min.

Tabela 6. Wyniki zwęglania nieimpregnowanej płyty z sosny bielastej  
Table 6. Charring results for non-impregnated sapwood pine panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka KB/1		próbka KB/2		próbka KB/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	25,5	31	29	32	30	27	29,08
80	88	72,5	85	–	79	94	83,70
100	–	–	–	–	–	–	–

Tabela 7. Wyniki zwęglania impregnowanej płyty z sosny bielastej  
Table 7. Charring results for impregnated sapwood pine panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka BB/1		próbka BB/2		próbka BB/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	35	28	32,5	33	35	36	33,25
80	91	82,5	89	88	95	86	88,58
100	–	–	91	–	–	–	91



Rys. 3. Wykres zwęglania drewna sosny bielastej; KB/1-3 – nieimpregnowane; BB/1-3 – impregnowane

Fig. 3. Charring diagram of sapwood pine wood; KB/1-3 – non-impregnated; BB/1-3 – impregnated

### Podsumowanie

W EN 1995-1-2, tabela 3.1 [17], jako obliczeniową wartość prędkości zwęglania drewna klejonego warstwowo o gę-

stości większej niż 290 kg/m<sup>3</sup> przyjęto 0,70 mm/min. Prędkość uzyskana w przeprowadzonych badaniach ma podobną wartość po odpadnięciu warstwy impregnowanej. W pierwszych 30 min spalania próbki CLT wykazały średnią prędkość zwęglania niemal dwukrotnie wyższą, przy czym próbki impregnowane zwęglaly się wolniej. Znaczne zwiększenie prędkości zwęglania w porównaniu z normą EN 1995-1-2 wiąże się ze wzrostem prędkości zwęglania drewna po odpadnięciu w pierwszej warstwy CLT.

Otrzymane wyniki wskazują na **nieznaczny wpływ impregnacji zmniejszającej palność drewna sosnowego na odporność ogniową konstrukcji,**

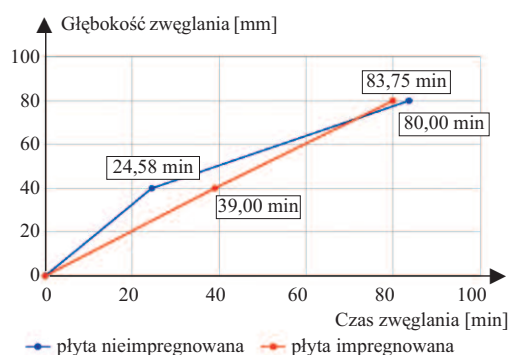
niezależnie od ilości naniesionego środka czynnego (tabela 10), przy czym przy ocenie wyników należy brać pod uwagę stwierdzone trudności z efektywnością przeprowadzonego procesu impregnacji (ponad 60% próbek poniżej wymaganej retencji, klasa reakcji na ogień niższa niż planowana do uzyskania). **Największy wpływ impregnacji ogniochronnej na zmniejszenie prędkości zwęglania w pierwszym etapie badania wykazało drewno topoli.** Próbką impregnowana zwęglala się o ok. 60% wolniej od nieimpregnowanej, co wskazuje na zasadność stosowania okładzin ogniochronnych z drewna topoli i pro-

Tabela 8. Wyniki zwęglania nieimpregnowanej płyty z topoli  
Table 8. Charring results for non-impregnated poplar panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka KT/1		próbka KT/2		próbka KT/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	23	23,5	27	28,5	22,5	23	24,58
80	84	82,5	87,5	87,5	80	81	83,75
100	85,5	–	91	–	88	–	86,75

Tabela 9. Wyniki zwęglania impregnowanej płyty z topoli  
Table 9. Charring results for impregnated poplar panel

Głębokość zwęglania [mm]	Czas zwęglania – temperatura 300°C [min]						średnia
	próbka BT/1		próbka BT/2		próbka BT/3		
0	0	0	0	0	0	0	0,00
40	39	47	32	47	35	34	39,00
80	–	–	76	84	75	85	80,00
100	–	–	–	–	–	–	–



Rys. 4. Wykres zwęglania drewna topoli; KT/1-3 – nieimpregnowane; BT/1-3 – impregnowane

Fig. 4. Charring diagram poplar wood; KT/1-3 – non-impregnated; BT/1-3 – impregnated

Tabela 10. Zestawienie wyników badań  
Table 10. Summary of test results

Gatunek drewna	Opis próbki	Czas zwęglania – 300°C		β – prędkość zwęglania	
		T (40 mm) [min]	T (80 mm) [min]	β <sub>1</sub> [mm/min]	β <sub>2</sub> [mm/min]
Sosna twar-dzie-łowa	nieimpregnowana	33,67	85,17	1,19	0,78
	impregnowana	34,83	83,33	1,15	0,82
Topola	nieimpregnowana	24,58	83,75	1,63	0,68
	impregnowana	39,00	80,00	1,03	0,98
Sosna bie-łasta	nieimpregnowana	29,08	83,63	1,38	0,73
	impregnowana	33,25	88,58	1,20	0,72

wadzenia dalszych badań. Kolejne prace badawcze powinny dotyczyć większej liczby impregnatów ogniochron-

nych oraz zwiększonej liczby termoelementów. Zasadne jest umieszczenie ich między każdą warstwą CLT oraz w połowie grubości.

Literatura

[1] Schickhofer G. Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen. Graz: Graz University of Technology. (2013) [1994]. DOI: 10.3217/978-3-85125-262-0. ISBN 978-3-85125-268-2.

[2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, (tekst ujednolicony).

[3] White RH. Charring rate of composite timber products. Proceedings of Wood and Fire Safety 4th International Conference, the High Tatras, Slovakia. 2000

[4] Njankou JM, Dotreppe JC, Franssen JM. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. 2004; DOI: 10.1002/fam.831.

[5] Hugi E, Wuersch M, Risi W, Waki-li KG. Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species. J Wood Sci. 2007; DOI: 10.1007/s10086-006-0816-1.

[6] Frangi A, Fontana M, Knobloch M, Bochicchio G. Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. Fire Saf Sci. 2008; DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1279.

[7] Friquin KL, Grimsbu M, Hovde PJ. Charring rates for cross-laminated timber panels exposed to standard and parametric fires. In: World conference on timber engineering. 2010; pp. 20 –2 4.

[8] Wen L, Han L, Zhou H. Factors Influencing the Charring Rate of Chinese Wood by using

the Cone Calorimeter. BioResources. 2015; DOI: 10.15376/biores. 10.4.7263-7272.

[9] Dębowska A. Prędkość zwęglania drewna w analizie pożarowej konstrukcji drewnianych. Roczniki Inżynierii Budowlanej – zeszyt 16/2016, s. 95-100. KIB Oddział PAN w Katowicach.

[10] Sulik P. (2022). Prędkość zwęglania wybranych krajowych gatunków drewna. Materiały Budowlane 9/2022 (601), DOI: 10.15199/33.2022.09, ISSN 0137-2971, e-ISSN 2449-951X, 100 pkt. wg MEiN.

[11] Bartlett AI, Hadden RM, Bisby LA. A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. Fire Technology. 2019; DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.

[12] Zajączkowski G, Jabłoński M, Jabłoński T, Szmidla H, Kowalska A, Małachowska J, Piwnicki J, Kaliszewski A. Raport o stanie lasów w Polsce 2022. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. 2023. ISSN 1641-3229.

[13] EN 384+A1:2018-12 Drewno konstrukcyjne – Oznaczanie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości.

[14] ISO 5660-1:2015/Amd 1:2019 Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement) – Amendment 1.

[15] Papis B, Sulik P, Jeliński M. Praca naukowo-eksperymentalna 01519/23/Z00NZP dotycząca technologii płyt konstrukcyjnych z klejonego krzyżowo drewna sosnowego z terenów Polski, o podwyższonej klasie reakcji na ogień, na potrzeby wielokondygnacyjnego budownictwa drewnianego. Instytut Techniki Budowlanej. 2023.

[16] PN-EN 13501-1:2019-02 Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień.

[17] PN-EN 1995:2008 + NA/2010 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: Postanowienia ogólne – Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

Badania zostały zrealizowane w ramach współpracy Instytutu Techniki Budowlanej ze spółką Polskie Domy Drewniane S.A. Badania prędkości zwęglania wykonano w ramach projektu NZP-138 pt. „Ocena bezpieczeństwa pożarowego w zakresie przydatności drewna klejonego, w tym CLT, do zastosowań w budownictwie”, a próbki CLT w ramach projektu POIR. 01.01.01-00-0076/21-00 pt. „Opracowanie technologii płyt konstrukcyjnych z klejonego krzyżowo drewna sosnowego z terenów Polski, o podwyższonej klasie reakcji na ogień, na potrzeby wielokondygnacyjnego budownictwa drewnianego” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Działania I.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 – 2022.

Przyjęto do druku: 18.04.2024 r.