

mgr inż. Jacek Atlas

**WYKORZYSTANIE WYBRANYCH TKANIN
TECHNICZNYCH NA BAZIE WŁÓKNA SZKLANEGO
DO ZABEZPIECZENIA ELEMENTÓW Z DREWNA
LITEGO IGLASTEGO W WARUNKACH POŻARU**

Praca doktorska napisana pod kierunkiem:

Promotor: dr hab. inż. Paweł Ogrodnik prof. SGGW

Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Marcin Wolański

Dąbrowa Górnicza 2026

Jacek ATŁAS

.....
Imię i nazwisko doktoranta

Dąbrowa Górnicza, ...

.....
Adres

OŚWIADCZENIE

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że złożona praca doktorska pt.: „Wykorzystanie wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego do zabezpieczenia elementów z drewna litego ilastego w warunkach pożaru” została napisana przeze mnie samodzielnie.

Równocześnie oświadczam, że praca doktorska nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. Nr 24, poz.83 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym.

Ponadto praca doktorska nie zawiera informacji i danych uzyskanych w sposób nielegalny i nie była wcześniej przedmiotem innych procedur urzędowych związanych z uzyskaniem dyplomów lub tytułów zawodowych uczelni wyższej.

Wyrażam również zgodę na udostępnianie pracy doktorskiej bez wynagrodzenia dla celów badawczych lub poznawczych Biblioteki Akademickiej Akademii WSB im. prof. J. Altkorna, z zastrzeżeniem, że udostępnianie to następować będzie wyłącznie na miejscu, w siedzibie Biblioteki.

.....
podpis doktoranta

Pusta strona

OŚWIADCZENIE PROMOTORA PRACY DOKTORSKIEJ

Oświadczam, że praca doktorska pt. „Wykorzystanie wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego do zabezpieczenia elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru” autorstwa Jacka Ałasa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data

Podpis promotora pracy

Pusta strona

PODZIĘKOWANIA

Praca, którą oddaję do rąk Czytelnika, nie powstałaby bez życzliwości, zaangażowania i cierpliwości Osób, którym chciałbym w tym miejscu szczególnie podziękować.

Wyrazy głębokiej wdzięczności kieruję do Pana dr. hab. inż. Pawła Ogrodnika, prof. SGGW Promotora niniejszej rozprawy za otwartość na nieszablonowy temat badawczy, wyrastający z praktyki zawodowej, za merytoryczne prowadzenie oraz za konsekwentne wskazywanie kierunku.

Również serdeczne podziękowania składam Panu dr. inż. Robertowi Marcinowi Wolańskiemu Promotorowi pomocniczemu za nieocenioną pomoc na każdym etapie pracy.

Obu Promotorom dziękuję za zaufanie, czas i wiedzę, bez Nich ta rozprawa pozostałaby jedynie zamysłem.

Pusta strona

Spis treści

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I DEFINICJI STOSOWANYCH W ROZPRAWIE	15
WSTĘP	16
1. PROBLEM NAUKOWY, CEL, ZAKRES PRACY I TEZY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	20
1. Problem naukowy	20
1.1. Identyfikacja problemu	20
2. Cel pracy	23
2.1. Cel główny	23
2.2. Cele szczegółowe	23
3. Zakres pracy	24
3.1. Zakres przedmiotowy	24
3.2. Zakres metodyczny	25
ROZDZIAŁ 2. zachowanie się drewna litego jako materiału konstrukcyjnego w warunkach oddziaływania termicznego pożaru	26
2.1. Zjawisko pożaru w ujęciu inżynierii bezpieczeństwa pożarowego	26
2.1.1. Fazy rozwoju pożaru w obiektach budowlanych	27
2.1.2. Normowe krzywe temperaturowo-czasowe oraz ich znaczenie dla badań laboratoryjnych i poligonowych	28
2.2. Drewno lite iglaste jako materiał konstrukcyjny	29
2.2.1. Drewno w budownictwie-rys historyczny i współczesna pozycja materiału	29
2.2.2. Budowa anatomiczna i właściwości fizyczne drewna iglastego	30
2.2.3. Wpływ wilgotności na właściwości mechaniczne drewna	34
2.3. Niejednorodność drewna litego jako materiału badawczego i jej konsekwencje dla standaryzacji wyników	43
2.4. Fizykochemia spalania i piroliza drewna	45

2.4.1. Etapy termicznego rozkładu drewna	45
2.4.2. Produkty spalania i ich wpływ na środowisko pożaru	49
2.5. Zwęglanie drewna litego – podejście normowe	50
2.5.1. Metoda przekroju resztkowego wg PN-EN 1995-1-2	50
2.6. Podsumowanie rozdziału – wnioski dla dalszych badań	56
ROZDZIAŁ 3. METODY BIERNEJ OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ KONSTRUKCJI DREWNIANYCH – STAN WIEDZY, MECHANIZMY DZIAŁANIA I OGRANICZENIA	58
3.1. Klasyfikacja metod biernej ochrony – mechanizmy i kryteria oceny	59
3.1.1. Systematyka metod – podział funkcjonalny i mechanizmowy	59
3.1.2. Rozróżnienie: reakcja na ogień (reaction to fire) a nośność ogniowa (fire resistance).....	59
3.2. Impregnacja ogniochronna – mechanizm, skuteczność i ograniczenia.....	60
3.2.1. Mechanizm działania środków ogniochronnych w postaci impregnatów – wpływ na prędkość zwęglania i parametry techniczne drewna	60
3.2.2 Okładziny ochronne elementów drewnianych – ochrona prze pirolizą	67
3.2.3 Farby i powłoki pęczniejące (intumescent coatings) – mechanizm, skuteczność i ograniczenia. Metody kombinowane	72
3.3. Analiza porównawcza metod – skuteczność, ograniczenia i zestawienie.....	77
3.3.1. Kryteria porównania i hierarchia skuteczności	77
3.4. Identyfikacja luki badawczej – przegląd krytyczny piśmiennictwa.....	78
3.4.1. Stan badań nad tkaninami technicznymi w ochronie pożarowej konstrukcji	78
ROZDZIAŁ 4. TKANINY TECHNICZNE – WŁAŚCIWOŚCI, KLASYFIKACJA I ZASTOSOWANIA W OCHRONIE PRZECIWPOŻAROWEJ, ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM TKANIN NA BAZIE WŁÓKNA SZKLANEGO.....	81
4.1. Tkaniny techniczne – systematyka i terminologia	81
4.1.1. Klasyfikacja ze względu na surowiec i przeznaczenie.....	81
4.2. Tkaniny szklane – właściwości surowcowe, termiczne i mechaniczne	82
4.2.1. Skład chemiczny i technologia wytwarzania	82

4.3. Tkaniny szklane z powłokami funkcjonalnymi	86
4.4. Dotychczasowe zastosowania tkanin technicznych w ochronie ppoż.	87
4.4.1. Kurtyny przeciwpożarowe i koce gaśnicze	87
4.4.2. Zabezpieczenia tymczasowe przy pracach pożarowo niebezpiecznych.....	89
4.4.1. Przegląd produktów dostępnych na rynku polskim	91
4.5. Przepływ ciepła przez przegrodę tekstylną – model analityczny	92
4.5.1. Jednostkowy opór cieplny	95
4.5.2. Wpływ szerokości szczeliny powietrznej	96
4.5.3. Ograniczenie migracji gazów pożarowych jako efekt addytywny	97
ROZDZIAŁ 5. Ramy normowe i prawne ochrony przeciwpożarowej konstrukcji drewnianych.....	99
5.1. Europejski i krajowy system klasyfikacji ogniowej	99
5.2. Polskie przepisy krajowe dotyczące bezpieczeństwa pożarowego budynków..	100
5.3. Rozwiązania zamienne i ekspertyzy techniczne jako ścieżka dla innowacyjnych metod ochrony	101
5.4. Przepisy dotyczące obiektów zabytkowych i wymagania konserwatorskie.....	105
5.5. Umieszczenie tkanin technicznych w kontekście normowym.....	106
ROZDZIAŁ 6. METODYKA BADAŃ — PROJEKT STANOWISK, DOBÓR MATERIAŁÓW I APARATURA POMIAROWA	108
6.1 Koncepcja programu badawczego	109
6.1.1 Strategia badawcza	109
6.1.2 Zmienne niezależne, zależne i kontrolowane	109
6.2 Dobór i przygotowanie materiału badawczego	110
6.2.1 Próbki drewna — gatunek, wymiary, sezonowanie	110
6.2.2 Tkaniny techniczne - kryteria wyboru i charakterystyka.....	113
6.3. Parametry charakterystyczne badanych tkanin.....	115
6.4. Stanowiska badawcze	127
6.4.1 Stanowisko badawcze wariant 1 i 2	130

6.4.2 System pomiarowy — termopary i akwizycja danych.....	132
6.5 Procedura badawcza	134
6.5.1 Przygotowanie próby badawczej	134
6.5.2 Przebieg ekspozycji termicznej	136
6.5.3 Procedura po próbie	138
6.6 Podsumowanie metodyki	139
ROZDZIAŁ 7. BADANIA LABORATORYJNE WŁAŚCIWE - OCENA SKUTECZNOŚCI OSŁONY Z TKANIN TECHNICZNYCH.....	141
7.1 Wyniki badań na stanowisku z zestawem promienników.....	141
7.1.1 Próbką – świadek	143
7.1.2 Próbką – tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem.....	144
7.1.3 Próbką – tkanina szklana ECTS gramatura 530 g/m ²	146
7.1.4 Próbką – tkanina szklana tzw. kocówka.....	147
7.1.5 Próbką – tkanina szklana modyfikowana płatkami aluminium	149
7.1.6 Porównanie wyników z badania laboratoryjnego z wykorzystaniem promienników.....	150
7.1.7 Podsumowanie wyników dla próby laboratoryjnej z promiennikami.....	154
7.2 Badania laboratoryjne na stanowisku z promiennikiem i palnikiem gazowym ..	158
7.2.1 Wyniki badań dla poszczególnych grup badawczych.....	158
7.3 Podsumowanie badań laboratoryjnych i wnioski do próby poligonowej	162
ROZDZIAŁ 8. BADANIA POLIGONOWE — WERYFIKACJA W SKALI MAKRO	164
8.1 Cel i założenia badań poligonowych.....	164
8.1.1 Uzasadnienie przejścia ze skali laboratoryjnej do makro	164
8.1.2 Trzy tkaniny wytypowane do prób poligonowych.....	164
8.2 Projekt stanowiska poligonowego.....	165
8.2.1 Koncepcja i wymiary ściany badawczej	165
8.2.2 Konstrukcja ściany - struktura materiałowa.....	165

8.3 Źródło ognia - stos drewnianych beleczek	168
8.3.1 Parametry stosu i gatunek drewna	168
8.3.2 Procedura zapalenia stosu	170
8.4 Warunki i przebieg prób poligonowych	171
8.4.1 Źródła niepewności w warunkach poligonowych	171
8.5 Wyniki badań poligonowych	172
8.5.1 Przebieg badania w ujęciu czasowym	172
8.5.2. Przebieg temperaturowy - krzywe czasowe dla trzech tkanin i próby referencyjnej	179
8.5.3. Ocena stanu tkanin w trakcie badania i po próbie	187
8.6. Analiza wyników badań poligonowych.....	203
ROZDZIAŁ 9. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TKANIN TECHNICZNYCH W OCHRONIE OBIEKTÓW Z KONSTRUKCJĄ DREWNIANĄ – OBIEKTY ZABYTKOWE, ZABEZPIECZENIA TYMCZASOWE PRZY PRACACH REMONTOWYCH ORAZ ETAP DOCHODZENIA DO PEŁNYCH WYMAGAŃ OCHRONY POŻAROWEJ	206
9.1 Typowe obiekty i elementy konstrukcyjne do zastosowania tkanin.....	206
9.2 Rekomendacje wdrożeniowe dla obiektów	208
9.3 Próba wdrożeniowa na obiekcie rzeczywistym	211
9.3.1 Charakterystyka obiektu i elementu zabezpieczanego – konstrukcja więźby dachowej	211
9.3.2 Projekt zabezpieczenia i przebieg implementacji	211
9.4 Podsumowanie rozdziału	214
ROZDZIAŁ 10. ANALIZA KOMPUTEROWA — MODELOWANIE POŻARU W FDS/PYROSIM	215
10.1 Charakterystyka narzędzi obliczeniowych — FDS i PyroSim	215
10.2 Model numeryczny stanowiska poligonowego.....	216
10.3 Wyniki symulacji i porównanie z danymi poligonowymi.....	221
10.4 Ocena przydatności narzędzia i wnioski.....	222

ROZDZIAŁ 11. DYSKUSJA WYNIKÓW I WERYFIKACJA HIPOTEZ BADAWCZYCH	224
11.1. Synteza wyników badań laboratoryjnych i poligonowych	224
11.2. Weryfikacja hipotezy głównej	226
11.3. Weryfikacja tez szczegółowych	226
<i>Opóźnienie inicjacji zwęglenia.....</i>	226
<i>Zróźnicowanie skuteczności między typami tkanin</i>	227
<i>Zgodność wyników laboratoryjnych i poligonowych</i>	227
<i>Przydatność jako rozwiązania zamiennego.....</i>	228
11.4. Ograniczenia badań i niepewności pomiarowe	228
11.5. Znaczenie wyników dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.....	229
ZAKOŃCZENIE.....	231
Wykaz rysunków	236
Wykaz tabel.....	241
Wykaz Wykresów	242
Wykaz wzorów.....	244
Bibliografia.....	245
Akty prawne	248
STRESZCZENIE	251
ABSTRACT	253

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I DEFINICJI STOSOWANYCH W ROZPRAWIE

f, k - wytrzymałość na zginanie

$f_{c,0,k}$ - wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien

$f_{k,0,k}$ - rozciąganie wzdłuż włókien

$f_{v,k}$ - wytrzymałość na rozciąganie

$E_{o, mean}$ - moduł sprężystości wzdłużnej

β_0 - szybkość zwęglania drewna [mm/min]

$d_{char,0}$ - obliczeniowa głębokość zwęglania dla zwęglania jednokierunkowego

$d_{char,n}$ - hipotetyczna głębokość zwęglania

d_0 - głębokość warstwy o założonej zerowej wytrzymałości i sztywności

d_{ef} efektywna gł. zwęglania

ε_R - emisyjność

q - gęstość strumienia ciepłego [W/m²]

λ - współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna) materiału [W/(m·K)]

$r_{\lambda p}$ - opór cieplny właściwy warstwy jednorodnej

GKF - płyta gipsowo kartonowa do zastosowań pożarowych

CLT - (drewno warstwowe krzyżowe) to materiał konstrukcyjny wykonany z wielu warstw elementów drewnianych, ułożonych naprzemiennie prostopadle do siebie i sklejonych klejami.

LVL - (drewno z okleiny laminowanej) to materiał konstrukcyjny wykonany z cienkich warstw okleiny drewnianych (zazwyczaj z drewna iglastego), sklejonych równolegle do siebie za pomocą klejów syntetycznych. Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, stabilnością wymiarową i jednorodnością właściwości mechanicznych.

R – Nośność ogniowa

E – Szczelność ogniowa

I – Izolacyjność ogniowa

PSP – Państwowa Straż Pożarna

WT - warunki techniczno-budowlane – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

WSTĘP

Problem dotyczący biernej ochrony przeciwpożarowej drewnianych elementów nośnych należy do tych zagadnień inżynierii bezpieczeństwa, w których rozbieżność między wymaganiami techniczno-prawnymi, z aktualnymi możliwościami technologicznymi jest szczególnie wyraźna. W praktyce realizacji zabezpieczeń ogniochronnych obserwuje się powtarzającą sytuację, w której klasyczne metody ochrony w postaci: okładzin płytowych, mas natryskowych, powłok pęczniejących i impregnacji ogniochronnych okazują się niewykonalne, niedostępne lub wprost wykluczone przez przepisy konserwatorskie w odniesieniu do znacznej grupy obiektów. Problem ten dotyka w szczególności obiektów zabytkowych, których konstrukcje dachowe i stropowe, nierzadko kilkuwiekowe, nie spełniają obowiązujących wymagań odporności ogniowej¹, a jednocześnie podlegają rygorom ochrony konserwatorskiej, ograniczającym lub uniemożliwiającym ingerencję w substancję historyczną. Identyfikacja tej luki zarówno technicznej, jak i badawczej stanowi bezpośredni punkt wyjścia tej rozprawy.

Pożary obiektów o drewnianej konstrukcji nośnej zarówno historycznych, jak i współczesnych stanowią jedno z najpoważniejszych zagrożeń dla dziedzictwa kulturowego i materialnego w skali globalnej. Analizy CNBOP-PIB dokumentują systemowe deficyty w ochronie przeciwpożarowej obiektów zabytkowych w Polsce², a międzynarodowe studia przypadków potwierdzają rosnącą skalę strat: od katastrof w obiektach typu katedry po zniszczenia obiektów wpisanych na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO^{3,4}. Na szczególną uwagę zasługuje specyfika materiałowa drewna zabytkowego: intensywnie sezonowane, z rozbudowaną siecią szczelin radialnych, wykazuje ono przyspieszone i nierównomierne zwęglanie⁵, co zasadniczo utrudnia jego ochronę metodami konwencjonalnymi. Problematyka ta ma charakter uniwersalny,

¹ Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. 2002 nr 75 poz. 690, z późn. zm.

² J. Zboina (red.), *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego obiektów zabytkowych. Wyniki badań i rekomendacje*, CNBOP-PIB, Józefów 2017.

³ F. Rodrigues, F. Maia, H. Cruz, *Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century*, International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment 2022, s. 1-19.

⁴ D. Venegas [i in.], *Fires in World Heritage Buildings*, Advances in Intelligent Systems and Computing 2021, s. 1-15.

⁵ G. Harun, B. Chorlton, F. Richter, J. Gales, *The effects of radial cracks on the fire performance of heritage timber*, Fire and Materials 47(3), 2023 t. s. 386-399.

zmaga się z nią inżynieria bezpieczeństwa, służby ratownicze i środowisko naukowe w całej Europie i poza nią.

Rosnące zainteresowanie drewnem jako materiałem konstrukcyjnym nadaje opisanej problematyce dodatkowy wymiar. Zwiększająca się popularność budynków wielokondygnacyjnych z masywnego drewna klejonego warstwowo (CLT), ekspansja budownictwa pasywnego i energooszczędnego oraz europejska polityka klimatyczna promująca materiały o niskim śladzie węglowym sprawiają, że bezpieczne stosowanie drewna przestaje być zagadnieniem wyłącznie technicznym, stając się kwestią cywilizacyjną. Drewno lite iglaste pozostaje przy tym niezależnie od zaawansowania technologicznego drewna inżynierskiego najszerzej stosowanym materiałem konstrukcyjnym w polskim i europejskim budownictwie, a jego zachowanie w warunkach pożaru jest przedmiotem intensywnych badań od wielu lat⁶. Nowe technologie obróbki i preparacji drewna pozwoliły wyeliminować część jego niekorzystnych właściwości pożarowych. Niemniej drewno lite iglaste, z uwagi na niejednorodność struktury, zmienność wilgotności i obecność sęków, pęknięć i innych wad, jest bardziej podatne na oddziaływanie termiczne, dlatego podejście zachowawcze, bezpieczne jest proponowane w normatywnych metodach obliczeniowych zawartych w PN-EN 1995-1-2. Trwające obecnie prace nad rewizją tego ważnego dokumentu wskazują na aktualność problemu w ujęciu inżynierskim oraz na zrewidowanie podejścia do warstwy zwęglonej oraz szybkości tego procesu dla elementów zabezpieczonych⁷.

Dotychczasowe metody biernej ochrony przeciwpożarowej konstrukcji drewnianych, mimo udokumentowanej skuteczności w standardowych konfiguracjach, obarczone są istotnymi ograniczeniami technicznymi i aplikacyjnymi. Rosnące zapotrzebowanie inżynierskie na rozwiązania możliwe do zastosowania przy złożonych geometriach więźb dachowych konstrukcji drewnianych np. w wieżach kościelnych i stropach otwartych w obiektach równocześnie objętych ochroną konserwatorską, wskazuje na istnienie realnej luki techniczno-badawczej, której wypełnienie stanowi warunek niezbędny dla zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa pożarowego.

⁶ A.I. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, *A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction*, Fire Technology t. 55, 2019, s. 1-48.

⁷ A. Frangi [i in.], *The second generation of Eurocode5 – Fire design*, Conference: World Conference on Timber Engineering 2025, s 11-18.

Zainteresowanie tkaninami technicznymi jako potencjalnym rozwiązaniem opisanego dylematu wyrosło z doświadczeń zawodowych autora przy realizacji zabezpieczeń przeciwpożarowych i opracowywaniu ekspertyz popożarowych w obiektach o skomplikowanej geometrii konstrukcyjnej. Tkaniny szklane i krzemionkowe, od lat stosowane z powodzeniem jako osłony urządzeń wysokotemperaturowych, w odzieży ochronnej strażaków, choć obecnie w ograniczonym stopniu oraz w kurtynach i kocach gaśniczych, stanowią przykład do weryfikacji w nowej roli: bezpośredniej przegrody termicznej chroniącej elementy z drewna litego iglastego. Dotychczasowe badania Takahashiego^{8,9}, potwierdziły aplikacyjność tkanin szklanych w ochronie zewnętrznej budynków przed pożarami obszarów WUI (*wildland-urban interface*), zaś prace Tsapko i in.¹⁰ wykazały możliwość transferu ciepła przez tkaninę do drewna w układach wielowarstwowych. Żadna z tych prac nie podjęła jednak zagadnienia skuteczności tkaniny technicznej jako samodzielnej, zewnętrznej przegrody termicznej w warunkach pożaru wewnętrznego, oddziałującego na nośne elementy z drewna litego iglastego. Identyfikacja tej luki stanowi zasadniczy, naukowy impuls do podjęcia tematu.

Rozprawa opiera się na autorskim programie badawczym obejmującym badania laboratoryjne i poligonowe, przeprowadzane na stanowiskach zaprojektowanych i wykonanych przez autora. Całość procesu badawczego od doboru i przygotowania próbek drewna i tkanin, przez opracowanie procedury eksperymentalnej, po wykonanie pomiarów i ich analizę stanowi samodzielny wkład autora. Praca dostarcza pierwszych danych eksperymentalnych o skuteczności osłon tekstylnych w ochronie ogniowej elementów nośnych z drewna litego iglastego i proponuje ich adaptację jako niestandardowych zabezpieczeń w duchu podejścia dopuszczonego przez polskie prawo jako rozwiązanie zamienne nie pogarszające warunków ochrony przeciwpożarowej¹¹.

Kwerenda literatury naukowej wykazała jednoznacznie, że problem tkaniny technicznej jako zewnętrznej, samodzielnej osłony termicznej elementu nośnego z

⁸ F. Takahashi [i in.], *Characteristics of Fire Blanket Materials for Structure Protection in Wildland-Urban Interface Fires*, VI International Conference on Forest Fire Research 2010, s.1-14.

⁹ F. Takahashi, *Whole-House Fire Blanket Protection From Wildland-Urban Interface Fires*, *Frontiers in Mechanical Engineering* t. 5, 2019, s.1-22.

¹⁰ Y. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, *Determination of the laws of thermal resistance of wood in application of fire-retardant fabric catings*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, s. 13-18.

¹¹ Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, Dz. U. 2010 poz. 719, z późn. zm.

drewna litego iglastego nie był dotychczas przedmiotem szerszych badań. Zidentyfikowana luka jest precyzyjnie zlokalizowana, technicznie istotna i otwiera przestrzeń oryginalnego wkładu naukowego w dyscyplinę inżynierii bezpieczeństwa.

1. PROBLEM NAUKOWY, CEL, ZAKRES PRACY I TEZY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

1. Problem naukowy

1.1. Identyfikacja problemu

Bierna ochrona przeciwpożarowa drewnianych elementów nośnych należy do tych zagadnień inżynierii bezpieczeństwa, w których oczekiwania między wymaganiami techniczno - prawnymi a możliwościami technologicznymi jest szczególnie wyraźne. Obowiązujące przepisy techniczno-budowlane¹² oraz postanowienia EN 1995-1-2¹³ nakładają na projektantów obowiązek zapewnienia określonej nośności ogniowej elementów drewnianych. Cytowane rozporządzenie nakłada obowiązek, aby przy projektowaniu i wykonaniu budynku uwzględnić ograniczenie możliwości powstania pożaru, a w razie jego wystąpienia zapewnić:

- *zachowanie nośności konstrukcji przez określony czas,*
- *ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu wewnątrz budynku,*
- *ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie obiekty budowlane lub tereny przyległe,*
- *możliwość ewakuacji ludzi lub ich uratowania w inny sposób,*
- *uwzględnienie bezpieczeństwa ekip ratowniczych¹⁴.*

Przedstawione wymagania dotyczą nie tylko elementów z drewna, ale też innych wykorzystywanych w procesie budowlanym. Analiza wymagań wskazuje, że poszczególne elementy z uwagi na warunki pożarowe pełnią różną funkcję, od przenoszenia obciążeń statycznych aż po obciążenia wyjątkowe, jakim jest pożar do funkcji, którą jest izolowanie bądź ograniczanie rozprzestrzeniania czynników pożarowych.

Przedstawione fundamentalne wymagania pod względem pożarowym nakładają wiele obowiązków na projektanta i wykonawcę, ale nie narzucają konkretnych

¹²Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych...,

¹³PN-EN 1995-1-2:2008 Projektowanie konstrukcji drewnianych z uwagi na warunki pożarowe.

¹⁴ Tamże §207

rozwiązań. Taka podstawa formalna umożliwia wybór konkretnych rozwiązań techniczno-funkcjonalnych w zakresie zabezpieczeń pożarowych.

Dotychczasowe metody biernej ochrony przeciwpożarowej: okładziny z płyt gipsowo-kartonowych i gipsowo-włóknowych, masy natryskowe, farby pęczniące oraz impregnacja ogniochronna, obarczone są istotnymi ograniczeniami technicznymi i aplikacyjnymi. Uniemożliwia to ich zastosowanie w obiektach zabytkowych o złożonej geometrii konstrukcyjnej lub podlegających ograniczeniom konserwatorskim.¹⁵ Powoduje to realny deficyt w możliwych zabezpieczeniach do wdrożenia. W szczególności dotyczy się to elementów takich jak: więźby dachowe o skomplikowanym układzie geometrycznym, obiekty zabytkowe w ujęciu ograniczeń konserwatorskich. Na uwagę zasługuje fakt, że problem zabezpieczenia przed pożarem dotyczy nie tylko etapu użytkowania obiektu, ale i też całego procesu budowlanego. Problem dotyczy również etapów, gdzie nie mamy jeszcze końcowego poziomu bezpieczeństwa pożarowego przez zastosowane systemy czynne i rozwiązania bierne w ochronie przeciwpożarowej. Przeprowadzona analiza pożarów dla obiektów wpisanych na światową listę dziedzictwa w latach 1990-2019 wykazała, że aż 21% tych zdarzeń miało bezpośredni związek przyczynowy z prowadzonymi pracami renowacyjnymi¹⁶. Duża ilość pożarów i to często w obiektach o dużej wartości historycznej i materialnej, powstaje właśnie w czasie prac remontowych, adaptacyjnych, w których nie możemy zapewnić pełnej funkcjonalności części zabezpieczeń, a często są one dopiero montowane lub testowane, co wpływa na zwiększenie możliwości powstania pożaru. Istotnym czynnikiem ryzyka podczas prac remontowo-budowlanych jest zastosowanie technologii wymagających otwartego ognia, generujących iskry i wykorzystujących materiały łatwopalne. Kombinacja technicznych zagrożeń z błędami ludzkimi lub zaniechaniami w podstawowych standardach bezpieczeństwa pożarowego wpływa na ilość i rozmiar powstałych pożarów w czasie prac remontowo – budowlanych. Analiza doświadczeń autora w wykonywaniu oględzin popożarowych oraz czynne uczestnictwo w procesie budowlanym wskazują na lukę w tym obszarze. Przyczyna leży w marginalizacji tego problemu na etapie projektowania, co skutkuje przypadkami zaniedbań na etapie wykonawczym. Brak sprecyzowania

¹⁵ J. Zboina (red.), *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego obiektów zabytkowych. Wyniki badań i rekomendacje*, CNBOP-PIB, Józefów 2017.

¹⁶ Venegas D [i in.], *Fires in World Heritage Buildings*, Artificial Intelligence, Computer and Software Engineering Advances 2021, s. 433-447.

wymagań i obowiązków dotyczących bezpieczeństwa pożarowego na etapie projektowania powoduje, że nie są one realizowane przez wykonawcę, a ich wprowadzenie na etapie budowy wiąże się z dodatkowymi kosztami.

Tkaniny techniczne od lat stosowane jako osłony w przemyśle, odzieży ochronnej strażaków oraz jako inne elementy zabezpieczeń przeciwpożarowych są naturalnym kandydatem do weryfikacji w nowej roli bezpośredniej przegrody termicznej.

Przegląd literatury^{17,18,19} naukowej wykazał jednoznacznie, że zastosowanie tkanin technicznych jako samodzielnej, zewnętrznej osłony termicznej elementu nośnego z drewna iglastego, działającej w warunkach pożaru wewnętrznego, nie było dotychczas przedmiotem systematycznych badań. Zidentyfikowana luka badawcza jest precyzyjnie zlokalizowana, technicznie istotna i stanowi podstawę dla oryginalnego wkładu naukowego.

1.2. Sformułowanie problemu naukowego

Problem badawczy rozprawy stanowi brak wiedzy potwierdzonej szerokimi badaniami i analizami skuteczności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego, jako zewnętrznych osłon termicznych, elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru. W szczególności nieznane są:

- wielkość opóźnienia inicjacji zwęglenia,
- zmiana profilu temperaturowego w przekroju elementu,
- zróżnicowanie skuteczności między typami tkanin,
- przydatności takiego zastosowania w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego,
- analizy wykorzystania tekstyliów technicznych jako rozwiązanie typowe i zamienne w zakresie zabezpieczeń biernych elementów budowlanych,
- analizy wpływu wykorzystania wybranych tekstyliów technicznych jako rozwiązania tymczasowego w zakresie ochrony przeciwpożarowej.

¹⁷ A.I. Bartlett, *A Review of Factors ...*

¹⁸ F. Takahashi [i in.], *Characterization of Fire Blanket...*

¹⁹ Y. Tsapko [i in.], Defining patterns of heat transfer through the fire-protected fabric to wood, *Estern European Journal of Enterprise Technologies*, 6/10(114) 2021, s. 48–56.

2. Cel pracy

2.1. Cel główny

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest empiryczna weryfikacja przydatności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako zewnętrznych osłon termicznych dla elementów nośnych z drewna litego iglastego w warunkach pożaru. Szczególną uwagę zwrócono na: szybkość zwęglenia drewna, modyfikację parametrów wpływających na szybkość degradacji elementu zabezpieczonego w warunkach pożaru oraz możliwość zastosowania tych rozwiązań jako alternatywnych zabezpieczeń biernych zgodnie z obowiązującymi przepisami na różnych etapach realizacji procesu budowlanego.

2.2. Cele szczegółowe

Realizacja głównego celu rozprawy wymagała osiągnięcia następujących celów szczegółowych:

- określenie efektu izolacyjno-barierowego wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego typu E-glass poprzez pomiar profili temperaturowych w przekroju elementu drewnianego zabezpieczonego osłoną tekstylną oraz elementu referencyjnego bez zabezpieczenia w warunkach kontrolowanych badań laboratoryjnych,
- weryfikacja wpływu osłon tekstylnych na kinetykę zwęglania drewna litego iglastego, w tym na: czas inicjacji zwęglania, szybkość liniowego postępu strefy zwęglonej, głębokość strefy zwęglonej oraz ukształtowanie profilu temperaturowego w przekroju chronionego elementu,
- porównanie skuteczności różnych wariantów tkanin technicznych, tkanin bez powłoki funkcyjnej oraz tkanin z powłokami aluminiowymi i modyfikacją wermikulitem w zakresie opóźnienia procesów termicznej degradacji drewna,
- empiryczna weryfikacja zachowania osłon tekstylnych w rzeczywistych warunkach pożaru poprzez przeprowadzenie badania poligonowego na pełnowymiarowej konstrukcji ściennej z elementów z drewna litego iglastego,
- opracowanie metodyki badań laboratoryjnych i poligonowych umożliwiającej ilościową ocenę skuteczności tkanin technicznych jako biernych zabezpieczeń przeciwpożarowych drewnianych elementów nośnych,

- analiza możliwości zastosowania tkanin technicznych jako rozwiązania tymczasowego lub alternatywnego w zakresie biernej ochrony przeciwpożarowej zgodnie z obowiązującymi przepisami techniczno-budowlanymi, ze szczególnym uwzględnieniem ochrony obiektów zabytkowych i konstrukcji drewnianych podczas prac remontowych i adaptacyjnych.

3. Zakres pracy

3.1. Zakres przedmiotowy

Zakres pracy obejmuje problematykę biernej ochrony przeciwpożarowej elementów nośnych z drewna litego iglastego z zastosowaniem wybranych tkanin technicznych jako zewnętrznych osłon. Badaniom poddano następujące grupy materiałów:

- tkaniny szklane (E-glass) bez powłoki,
- tkaniny szklane (E-glass) z powłokami funkcjonalnymi (aluminium, wermikulit),

Wskazane powyżej grupy materiałów są typowe w innych zastosowaniach w ochronie przeciwpożarowej.

Badania przeprowadzono na elementach z drewna litego iglastego (*Pinus sylvestris* L./*Picea abies* L.), najszerszej stosowanych w polskim budownictwie drewnianym. Zakres pracy nie obejmuje drewna liściastego, CLT, LVL ani innych materiałów drewnopochodnych. Badania skoncentrowano wyłącznie na wpływie osłon tekstylnych na szybkość zwęglania drewna. Pozostałe parametry pożarowe w szczególności nośność ogniowa (R) oraz klasy szczelności (E) i izolacyjności (I) wykraczają poza zakres rozprawy. Jako uzupełnienie określono parametry techniczno-funkcjonalne badanych materiałów osłonowych na podstawie badań laboratoryjnych i poligonowej próby w warunkach rzeczywistych.

W zakresie badań nie analizowano próbek pod przyłożonym obciążeniem w czasie badań. Jednak uzyskane wyniki zmian szybkości zwęglania dla poszczególnych prób umożliwiają korelację ich z wytycznymi normowymi w zakresie zmiany parametru nośności.

Wszystkie badania przeprowadzono w Polsce w laboratorium i na Poligonie Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie.

3.2. Zakres metodyczny

Program badawczy realizowany jest w czterech warstwach metodycznych:

- analiza literaturowa i przegląd normowy,
- badania laboratoryjne - dwa stanowiska: promienniki IR oraz otwarty płomień + promiennik IR,
- badania poligonowe w skali rzeczywistej,
- analiza CFD.

4. Tezy rozprawy doktorskiej

4.1. Teza główna

Teza główna: Tkaniny techniczne na bazie włókna szklanego, zastosowane jako zewnętrzne osłony termiczne, skutecznie opóźniają zwęglenie drewna iglastego i utratę nośności ogniowej elementów w warunkach pożaru.

4.2. Tezy szczegółowe

Na podstawie problemu naukowego i celów pracy sformułowano następujące tezy szczegółowe, podlegające weryfikacji w ramach programu badawczego:

- zastosowanie osłony z tkaniny technicznej opóźnia inicjację zwęglenia drewna litego iglastego w porównaniu z elementem niezabezpieczonym, w warunkach testowego pożaru,
- skuteczność osłony, mierzona opóźnieniem szybkości zwęglenia i zmniejszeniem strumienia ciepła, różni się między badanymi typami tkanin, przy czym największa różnica występuje pomiędzy elementami zabezpieczonymi a niezabezpieczonymi,
- wyniki badań laboratoryjnych i poligonowych są zgodne w granicach niepewności pomiarowej, co potwierdza trafność predykcijną modelu laboratoryjnego,
- zastosowanie tkanin technicznych jako rozwiązania zamiennego biernej ochrony przeciwpożarowej jest uzasadnione w kontekście obiektów zabytkowych i prac adaptacyjnych, gdzie tradycyjne metody zabezpieczenia są niedostępne lub prowadzą do niezamierzonej degradacji elementów historycznych.

ROZDZIAŁ 2. ZACHOWANIE SIĘ DREWNA LITEGO JAKO MATERIAŁU KONSTRUKCYJNEGO W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA TERMICZNEGO POŻARU

Rozdział drugi stanowi fundament teoretyczny rozprawy. Jego celem jest systematyczne przedstawienie wiedzy o zjawiskach zachodzących w warunkach pożaru oraz o mechanizmach, jakimi drewno lite iglaste reaguje na oddziaływanie wysokiej temperatury. Oba obszary są ściśle powiązane: zrozumienie kinetyki pirolizy, mechanizmu tworzenia warstwy zwęglonej i metod obliczeniowych nośności ogniowej jest niezbędne do oceny skuteczności biernych metod ochrony przeciwpożarowej, w tym tkanin technicznych stanowiących przedmiot badań pracy. Przegląd literatury obejmuje zarówno klasyczne pozycje o ugruntowanym znaczeniu w dyscyplinie, jak publikacje najnowsze, w tym polskojęzyczne badania z dziedziny inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, które w anglojęzycznym piśmiennictwie są cytowane rzadziej, lecz dostarczają danych bezpośrednio odnoszących się do krajowych gatunków drewna.

2.1. Zjawisko pożaru w ujęciu inżynierii bezpieczeństwa pożarowego

Pożar w obiekcie budowlanym jest procesem dynamicznym, którego przebieg determinuje zarówno warunki termiczne panujące wewnątrz pomieszczenia oraz charakter oddziaływania na elementy konstrukcyjne. Złożoność zjawiska wynika ze sprzężenia wielu procesów: pirolizy materiałów palnych, wymiany ciepła przez konwekcję, promieniowanie i przewodzenie, transportu masy gazów palnych oraz ich spalania w fazie gazowej²⁰. Zachowanie drewna litego iglastego nie może być opisane jednym parametrem, ponieważ warunki pożarowe zmieniają się w czasie i przestrzeni, a oddziaływanie termiczne na element zależy od fazy pożaru, geometrii pomieszczenia, obciążenia ogniowego i warunków wentylacji. Z perspektywy inżynierii bezpieczeństwa pożarowego istotne jest rozróżnienie pomiędzy fazą wzrostu pożaru, a fazą w pełni rozwiniętego pożaru, ponieważ właściwości materiału muszą być rozpatrywane oddzielnie w każdym z tych etapów.

²⁰ A.I. Bartlett, *A Review of Factors*, s. 1–49.

2.1.1. Fazy rozwoju pożaru w obiektach budowlanych

Rozwój pożaru w zamkniętym pomieszczeniu przebiega przez kilka charakterystycznych faz. *Faza inicjacji (zapłonu)* obejmuje moment powstania źródła ognia i wstępne zapalenie materiałów palnych w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Warunki termiczne w pomieszczeniu są w tej fazie zbliżone do normalnych, a oddziaływanie na elementy konstrukcyjne jest minimalne. *Faza wzrostu pożaru* charakteryzuje się narastającym wydzielaniem ciepła, wzrostem temperatury gazów podstropowych oraz rozprzestrzenianiem się ognia na kolejne materiały palne. W tej fazie kluczową rolę odgrywają właściwości poszczególnych materiałów. Drewno wykazuje stosunkowo wysoką temperaturę zapłonu, choć jak podaje cytowane źródło rozpiętość temperaturowa jest bardzo duża²¹. W związku z tym drewno wykazuje opóźnioną reakcję w porównaniu z materiałami o niskiej temperaturze zapłonu.

Punktem przełomowym jest zjawisko *rozgorzenia* (ang. *flashover*), definiowanego jako gwałtowne przejście od lokalnego pożaru do pełnego objęcia płomieniem wszystkich materiałów palnych w pomieszczeniu. Rozgorzenie następuje przy temperaturze gazów podstropowych rzędu 500–600°C. Zjawisko to przeanalizowali szczegółowo Krauze, Krasuski i Ślęczkowski w ramach studium teoretycznego opublikowanego przez CNBOP-PIB²², omawiając również warunki sprzyjające wstecznemu ciągowi płomieni (ang. *backdraft*). Po rozgorzeniu następuje *faza w pełni rozwiniętego pożaru*, w której od wszystkich powierzchni ogień rozprzestrzenia się jednolicie, a maksymalne temperatury przekraczają 900-1100°C. Zdolność elementu konstrukcyjnego do przeciwstawiania się oddziaływaniu w tym etapie określa się mianem odporności ogniowej, przy czym termin ten odnosi się do elementu, nie do samego materiału, ponieważ nośność zależy od warunków podparcia, rozkładu i wartości obciążeń.

Ostatnią fazą jest *faza stygnięcia*, w której intensywność wydzielania ciepła zmniejsza się wskutek wyczerpywania materiałów palnych lub ograniczenia dopływu powietrza. Z punktu widzenia nośności resztkowej drewna faza ta jest istotna: w jej trakcie nadal podwyższone temperatury przenikają głębiej w rdzeń elementu, zmieniając

²¹ V. Babrauskas, *Ignition of Wood: A Review of the State of the Art*, Journal of Fire Protection Engineering Vol 12, 2001, s. 163-189.

²² A. Krauze, A. Krasuski, B. Ślęczkowski, *Studium teoretyczne przewidywania ryzyka wystąpienia rozgorzenia, wstecznego ciągu płomieni oraz zapalenia gazów pożarowych*, CNBOP-PIB, Józefów 2016 s. 87-93.

wytrzymałość mechaniczną. W tym etapie nadal postępuje zwęglanie w głąb materiału oraz, co jest ważne dla trwałości konstrukcji, zmiany na granicy warstwy zwęglonej oraz warstwy, która nie została narażona na temperatury powyżej 200°C.

2.1.2. Normowe krzywe temperaturowo-czasowe oraz ich znaczenie dla badań laboratoryjnych i poligonowych

Pożar w pełni rozwinięty jest w badaniach laboratoryjnych i w obliczeniach projektowych reprezentowany przez standardową krzywą temperaturowo-czasową określoną w normie ISO 834. Krzywa ta, zwana potocznie krzywą celulozową, opisuje narastającą w czasie temperaturę gazów w komorze badawczej zgodnie z zależnością:

$$T = T_0 + 345 \cdot \log_{10} (8t + 1) \quad (1)$$

gdzie:

T - to temperatura w °C,

T₀ - temperatura początkowa w °C,

t - czas ekspozycji w minutach.

Krzywa nie odwzorowuje pełnego cyklu pożarowego, nie przewiduje fazy stygnięcia, co oznacza, że temperatura jest modelowana jako stale rosnąca. Ograniczenie to jest jedną z przesłanek stosowania pożarów parametrycznych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Krzywa celulozowa stanowi umowny, lecz walidowany scenariusz badawczy, będący punktem odniesienia dla klasyfikacji odporności ogniowej R, E i I w systemie europejskim²³. Jej zasadnicze ograniczenie polega na przyjęciu jednorodnego rozkładu temperatury w pomieszczeniu, niezależnie od jego geometrii, obciążenia ogniowego i warunków wentylacyjnych. Richter, Kotsovinos, Rackauskaite i Rein wykazali²⁴, że elementy poddane oddziaływaniu tzw. pożarów wędrówkowych, których front płomieni przemieszcza się przez pomieszczenie, wykazują istotne różnice w profilach termicznych w porównaniu z ekspozycją normową. Efektywna warstwa zerowej nośności jest przyjmowana w metodzie przekroju resztkowego jako stała i wnosi 7 mm. W warunkach pożarów niestandardowych może osiągać grubość nawet 12 mm dla wilgotności 12%, a 16 mm dla 5% wilgotności.

²³ PN-EN 1995-1-2:2008, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych...

²⁴ P. Kotsovinos [i in.]; *Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns*, Fire and materials t.47, 2023, s. 542-568.

W badaniach laboratoryjnych przyjęto oddziaływanie strumienia ciepłego odpowiadającego ekspozycji na krzywą normową. Badania poligonowe ze względu na warunki prowadzenia w otwartej przestrzeni i niemożność odwzorowania znormalizowanego rozkładu temperatury, realizowane były z wykorzystaniem pożaru testowego wskazanego w normie BS 8414. Z normy zaczerpnięto wymagania dotyczące stosu drewna i procedury podpalania, natomiast pozostałe wytyczne nie były realizowane. Świadomie wprowadzona różnica między obydwoma scenariuszami badawczymi wymaga ostrożności przy porównaniu wyników.

2.2. Drewno lite iglaste jako materiał konstrukcyjny

2.2.1. Drewno w budownictwie-rys historyczny i współczesna pozycja materiału

Drewno jest materiałem budowlanym o wielowiekowej tradycji stosowania, a jednocześnie dzięki rozwojowi technologii klejenia i inżynierii materiałowej przeżywa współcześnie renesans w budownictwie wielokondygnacyjnym. Produkty takie jak CLT (ang. *Cross-Laminated Timber*) i GLT (ang. *Glued-Laminated Timber*) stanowią alternatywę dla stali i betonu, zwłaszcza w kontekście redukcji śladu węglowego sektora budowlanego²⁵. Z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego rosnące zastosowanie drewna masywnego w budownictwie nowej generacji stawia przed środowiskiem naukowym i normalizacyjnym poważne wyzwania, wynikające z konieczności weryfikacji dotychczasowych metod obliczeniowych w odniesieniu do nowych produktów i nowych konfiguracji konstrukcyjnych.

Z punktu widzenia zastosowań konstrukcyjnych drewno dzieli się na dwie grupy botaniczne: iglaste (ang. *softwoods*) i liściaste (ang. *hardwoods*). Drewno iglaste w tym świerk pospolity (*Picea abies*), sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*) oraz jodła pospolita (*Abies alba*) dominuje w budownictwie konstrukcyjnym w Polsce i w całej Europie Środkowej i Północnej. Główny powód to korzystny stosunek wytrzymałości do masy, łatwość obróbki, dostępność surowca oraz dobrze rozpoznane właściwości mechaniczne i pożarowe. Zgodnie z danymi Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasów (WISL) za lata 2016 - 2020²⁶, w polskich lasach dominują gatunki iglaste wynoszące 68,3% ogólnych zasobów drzewostanów. Świerk, dominujący w zastosowaniach CLT w

²⁵ F. Wiesner, D. Brandon, A. Lucherini, P. Palma, *Structural Fire Behaviour*, Holistic Design of Taller Timber Building Structures, Springer, 2025, s.288-299.

²⁶ Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, *Wielkoobszarowa Inwentaryzacja Stanu Lasów (WISL) 2016–2020*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2021, s.61.

Europie Zachodniej i Skandynawii, w Polsce występuje przede wszystkim w rejonach górskich. Ta specyfika krajowej bazy surowcowej powoduje, że badania prędkości zwęglania i zachowania pożarowego gatunków iglastych, w tym świerka, mają szczególne znaczenie praktyczne i uzasadniają konieczność dysponowania krajowymi danymi doświadczalnymi, odrębnymi od danych pozyskanych z badań gatunków z innych obszarów.

2.2.2. Budowa anatomiczna i właściwości fizyczne drewna iglastego

Drewno iglaste charakteryzuje się stosunkowo prostą budową anatomiczną w porównaniu z drewnem liściastym. Jego struktura jest zdominowana przez cewki (ang. *tracheids*), komórki spełniające zarówno funkcję elementów przewodzących wodę, jak i elementów wytrzymałościowych. Cewki ułożone są równolegle do osi pnia, tworząc charakterystyczny układ pierścieni rocznych, składających się ze stref drewna wczesnego (komórki jaśniejsze, cienkościenne, o większym świetle) i drewna późnego (komórki ciemniejsze, grubościenne, o mniejszym świetle). Stosunek drewna wczesnego do późnego ma bezpośredni wpływ na gęstość, a tym samym na właściwości mechaniczne i termiczne materiału²⁷.

Świerk norweski (*Picea abies*) charakteryzuje się gęstością powietrznosuchą rzędu $408 \pm 21 \text{ kg/m}^3$ ²⁸, sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*) wykazuje gęstość wyższą rzędu $493 \pm 18 \text{ kg/m}^3$, a ponadto wyróżnia się wyraźnym zróżnicowaniem między bielą, a twardzielem oraz wyższą zawartością substancji żywicznych (3,5% wagowo w porównaniu z 1,7% dla świerku)²⁹. Przedstawione wartości pochodzą bezpośrednio z przeprowadzonych badań modeli pirolizy. Istotne jest, że drewno jako materiał o zróżnicowanych cechach jest bardzo zależny od środowiska warunków wzrostu, co zostało bardzo dobrze przedstawione na przykładzie sosny zwyczajnej autorstwa w opracowaniu Marka Wieruszewskiego³⁰. Wynik średniej gęstości dla analizowanych próbek wyniósł 560 kg/m^3 , ale rozbieżności pomiędzy poszczególnymi próbkami wahały się od wartości 424 kg/m^3 do nawet 725 kg/m^3 w odniesieniu do wilgotności 12%.

²⁷ Robert J. Ross, Forest Products Laboratory (FPL), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material* 2020.

²⁸ A. Rinta-Paavola, S. Hostikka, *A model for the pyrolysis of two Nordic structural timbers*, Fire and Materials, vol. 46(1), 2021 s.1-14.

²⁹ A. Rinta-Paavola, D. Sukhomlinov, S. Hostikka, *Modelling charring and burning of spruce and pine woods during pyrolysis, smoldering and flaming*, Fire Technology, vol. 59(5), 2023, s. 2751-2786.

³⁰ M. Wieruszewski, *Klasyfikacja jakościowo-wytrzymałościowa drewna sosny zwyczajnej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu 2019, s.78.

Dlatego kolejny raz na bazie dostępnej literatury możemy potwierdzić dużą zmienność drewna jako materiału badawczego, co przekłada się na wyniki końcowe oraz możliwość walidacji ich na całą grupę materiałową. Te różnice anatomiczne i chemiczne przekładają się bezpośrednio na odmienną kinetykę pirolizy obu gatunków, wyższa zawartość substancji ekstrakcyjnych w sośnie prowadzi do wyższego wydzielania ciepła i odmiennego składu produktów pirolizy.

2.2.3. Właściwości mechaniczne drewna w temperaturze normalnej podwyższonej

Parametry wytrzymałościowe drewna litego iglastego w warunkach normalnych: temperatura 20°C, wilgotność względna powietrza 65%, wilgotność drewna ok. 12% są znormalizowane na poziomie europejskim w ramach normy *PN-EN 338:2016 Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości*. Norma ta przyporządkowuje gatunki iglaste do klas wytrzymałościowych oznaczonych symbolem C (ang. *coniferous*), przy czym liczba po literze C odpowiada charakterystycznej wytrzymałości na zginanie wyrażonej w MPa³¹.

Dla klasy C24, stanowiącej minimum wymagane dla drewna konstrukcyjnego stosowanego w budownictwie w Polsce (wieżby dachowe, ściany szkieletowe), norma określa m.in. następujące charakterystyczne wartości: wytrzymałość na zginanie $f_{m,k} = 24$ MPa, wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien $f_{c,0,k} = 21$ MPa, wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien $f_{k,0,k} = 14$ MPa, wytrzymałość na ścinanie $f_{v,k} = 4,0$ MPa, moduł sprężystości wzdłużnej (wartość średnia) $E_{0,mean} = 11\ 000$ MPa³².

Wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien stanowi w drewnie iglastym największą spośród podstawowych cech wytrzymałościowych. Granica proporcjonalności dla drewna iglastego osiąga przy tym ok. 0,80 wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien, co wskazuje na stosunkowo wąski zakres odkształceń sprężystych przed zniszczeniem. Dla bezsęcznych próbek laboratoryjnych sosny wartości wytrzymałości na rozciąganie wzdłuż włókien znacznie przekraczają wartości charakterystyczne przyjmowane normatywnie dla tarcicy konstrukcyjnej z naturalnie występującymi wadami³³.

Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien jest niższa od wytrzymałości na rozciąganie w tym samym kierunku, gdyż mechanizm zniszczenia przy ściskaniu, utrata

³¹ PN-EN 338:2016-06, Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.

³² PN-EN 338:2016...

³³ M. Wieruszewski, Sosna zwyczajna..., s. 84.

stateczności lokalnej włókien i mikrowyboczenie są inne niż przy rozciąganiu. Wieruszewski, badając właściwości mechaniczne próbek wielkowymiarowych i laboratoryjnych sosny, wskazuje na istotną zmienność tych wartości wynikającą z gęstości drewna i udziału drewna późnego w słojach rocznych³⁴.

Wytrzymałość na zginanie statyczne plasuje się pośrednio między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na rozciąganie, ze względu na jednoczesne występowanie obu rodzajów naprężeń w przekroju zginanego elementu – ściskających w strefie ściskanej i rozciągających w strefie rozciąganej. Wytrzymałość na zginanie statyczne drewna iglastego rośnie wraz z gęstością materiału i udziałem drewna późnego oraz maleje wraz z kątem odchylenia włókien i obecnością sęków³⁵.

Ekspozycja drewna na podwyższoną temperaturę powoduje stopniową degradację jego składników chemicznych, a w konsekwencji obniżenie właściwości mechanicznych. Zrozumienie mechanizmu tych zmian jest niezbędne w kontekście biernej ochrony przeciwpożarowej konstrukcji z drewna litego iglastego, gdyż w warunkach pożaru elementy nośne narażone są na jednoczesne oddziaływanie sił zewnętrznych i wysokich temperatur³⁶.

Na poziomie mikrostrukturalnym drewno jest niejednorodnym kompozytem komórkowym zbudowanym z celulozy, hemicelulozy i ligniny. Celuloza, stanowiąca największy udział objętościowy, tworzy długie łańcuchy węglowe decydujące o wytrzymałości mechanicznej drewna. Hemiceluloza – złożona z rozgałęzionych polimerów amorficznych – wypełnia przestrzeń między celulozą a ligniną w strukturze drewna, natomiast lignina pełni funkcję substancji wiążącej, odpowiedzialnej za kohezję struktury komórkowej³⁷.

Badania przeprowadzone przez Oszust i in. ze Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, opublikowane w 2011 r. w czasopiśmie „Drewno - Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty”, wykazały zróżnicowane progi termicznej degradacji poszczególnych składników drewna. Degradacja hemicelulozy następuje w zakresie temperatur 150 - 200°C, co powoduje wyraźny spadek wytrzymałości drewna już w tym

³⁴ M. Wieruszewski, *Sosna zwyczajna...*, s. 82.

³⁵ Tamże, s. 82.

³⁶ M. Oszust, D. Pieniak, P. Ogrodnik, L. Dec, *Badanie spadku wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego termicznie w warunkach temperatur pożarowych*, „Drewno – Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty” Vol. 54, 2011, nr 185, s. 97–108.

³⁷ Tamże, s. 98.

przedziale termicznym. Dekompozycja ligniny stanowiącej o spoistości struktury drewna zachodzi w zakresie 220 - 250°C, natomiast degradacja wysuszonej celulozy następuje dopiero w temperaturze ok. 300°C³⁸.

W przywołanych badaniach ocenie poddano drewno świerkowe modyfikowane termicznie oraz niemodyfikowane w symulowanych warunkach termicznych pożaru, w zakresie od 20°C (temperatura odniesienia) do 230°C (temperatura bliska zapłonowi powierzchni drewna). Wyniki wykazały, że zauważalna redukcja wytrzymałości doraźnej drewna świerkowego niemodyfikowanego termicznie zaczyna się już powyżej 150°C, co koreluje z procesem intensywnej degradacji hemicelulozy. W tej samej temperaturze obserwuje się charakterystyczny wzrost odchylenia standardowego wyników wytrzymałości, wskazujący na narastającą niejednorodność mechaniczną materiału. Przeprowadzona analiza próbek drewna sosnowego klejonego warstwowo w próbie na zginanie w przedziale temperatur 20-230°C wykazuje znaczny spadek wartości tego parametru od 85,75 MPa w 20°C do nawet 24,50 MPa w 230°C³⁹. Przedstawione wyniki wskazują na bardzo ważny aspekt, którym jest ochrona drewna nawet w jego początkowej fazie lub w miejscach oddalonych od ogniska pożaru. Umożliwia to zachowanie zdolności drewna do dalszego funkcjonowania w procesie odbudowy konstrukcji. Obserwacja ta ma znaczenie praktyczne dla prac konserwatorskich i remontowych w obiektach po pożarze. W kontekście biernej ochrony przeciwpożarowej szczególne znaczenie nabiera zjawisko zwęglania powierzchni drewna. Warstwa węgla drzewnego, formująca się na ekspozycji elementu, wykazuje bardzo niskie przewodnictwo cieplne i pełni rolę naturalnej izolacji termicznej chroniącej niezwęglony rdzeń. Normatywna prędkość zwęglania drewna iglastego, przyjmowana w Eurokodzie 5 do obliczania przekroju resztkowego, wynosi $\beta_0 = 0,8$ mm/min dla drewna o gęstości co najmniej 290 kg/m³. Mechanizm ten sprawia, że elementy drewniane masywne zachowują nośność przez ograniczony, ale przewidywalny czas ekspozycji ogniowej⁴⁰.

Cytowana norma zawiera również zależności zmian parametrów fizycznych drewna w funkcji temperatury charakterystycznej dla warunków pożaru. Zmiany te zachodzą w różnych strefach elementu (zewnętrznej, przejściowej, wewnętrznej) i

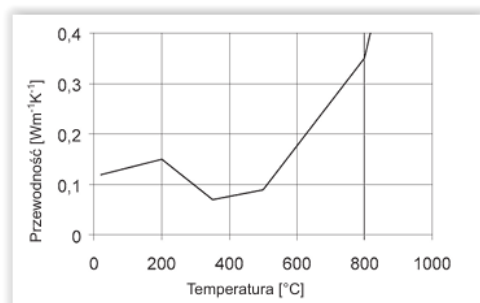
³⁸ Tamże, s. 98.

³⁹ D. Pieniak, P. Ogrodnik, M. Oszust, L. Dec, *Niezawodność w wysokich temperaturach klejonego warstwowo drewna sosny pospolitej w zakresie wytrzymałości na zginanie statyczne*, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” 2011, nr 3, s. 63–68.

⁴⁰ M. Oszust i in., *Badanie spadku wytrzymałości...*, s. 103.

stanowią podstawę do wprowadzenia poprawek w obliczeniach dotyczących głębokości strefy zwęglonej i nośności elementu w warunkach pożarowych.

Wykres 1. Zależność przewodności cieplnej od temperatury dla drewna i warstwy zwęglonej



Źródło: PN-EN 1995-1-2:2008, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2 str. 49

Tabela 1. Zależność przewodności cieplnej od temperatury dla drewna i warstwy zwęglonej

Temperatura °C	Przewodność cieplna Wm ⁻¹ K ⁻¹
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

Źródło: PN-EN 1995-1-2:2008, Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2 str. 49

2.2.3. Wpływ wilgotności na właściwości mechaniczne drewna

Wilgotność drewna stanowi jeden z najistotniejszych czynników modyfikujących jego właściwości mechaniczne. Relacja ta wynika bezpośrednio ze struktury komórkowej drewna i mechanizmu wiązania wody w ścianie komórkowej. Rozróżnia się dwa zasadnicze stany wody w drewnie: wodę wolną, wypełniającą cewki i naczynia oraz wodę związaną, nasycającą ściany komórkowe i przestrzenie międzymicelarne⁴¹.

Graniczna wartość wilgotności, powyżej której ściany komórkowe nie mogą wchłonąć już więcej wody związanej, nosi nazwę punktu nasycenia włókien. Dla drewna gatunków iglastych bez zabarwionej twardzieli (świerk i jodła) oraz biel gatunków o zabarwionej twardzieli (sosna i modrzew), o dużej wilgotności nasycenia włókien wynosi od 30 do 34% w zależności od gatunku. Wielokrotnie potwierdzona eksperymentalnie prawidłowość głosi, że zmiany wilgotności drewna poniżej punktu nasycenia włókien

⁴¹ P. Kozakiewicz, M. Matejak, Klimat a drewno zabytkowe, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2006, s. 111.

mają istotny wpływ na jego właściwości wytrzymałościowe, natomiast dalszy wzrost wilgotności powyżej tego punktu poprzez absorpcję wody wolnej nie wpływa już na wytrzymałość drewna⁴².

Wzrost wilgotności drewna od 0% do punktu nasycenia włókien powoduje systematyczny spadek wszystkich podstawowych właściwości wytrzymałościowych. Woda związana, wnikając w przestrzenie międzymicelarne ścian komórkowych, osłabia wiązania między łańcuchami celulozy i ligniny, redukując spójność struktury i jej odporność na odkształcenia. Zjawisko to jest w przeważającym stopniu odwracalne, osuszenie drewna przywraca jego właściwości wytrzymałościowe, o ile nie wystąpiły trwałe uszkodzenia struktury (pęknięcia desorpcyjne, porażenie biologiczne)⁴³.

Kozakiewicz i in. w monografii poświęconej klimatycznym uwarunkowaniom trwałości drewna zabytkowego wskazują, że zmiany właściwości mechanicznych drewna iglastego w funkcji wilgotności mają przebieg nieliniowy, przy czym najintensywniejsze zmiany przypadają na zakres 0-15%. Dla sosny zwyczajnej i świerka pospolitego obniżenie wilgotności o każdy punkt procentowy w zakresie higroskopijnym przynosi wyraźny wzrost wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, wytrzymałości na zginanie oraz twardości⁴⁴. Analiza właściwości mechanicznych wykazała, że praktycznie wszystkie właściwości drewna wzrastają wraz ze spadkiem wilgotności poniżej punktu nasycenia włókien⁴⁵.

Praktycznym następstwem opisanej zależności jest normalizacyjne ustalenie wilgotności referencyjnej dla obliczeń wytrzymałościowych. Norma PN-EN 338:2016-06 oraz Eurokod 5 (PN-EN 1995-1-1) przyjmują jako bazową wilgotność równoważną odpowiadającą temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza 65%, co dla drewna iglastego odpowiada wilgotności ok. 12%. Wszystkie charakterystyczne wartości wytrzymałości podane w tablicach normy PN-EN 338 odnoszą się do tej wilgotności referencyjnej⁴⁶.

⁴² Tamże, s. 106.

⁴³ D. Habyk, M. Goździewska, J. Kielbratowski, K. Ryncewicz, *Doświadczalna analiza wpływu wilgotności na parametry mechaniczne drewna iglastego* Builder 314(9):11-15, 2023.

⁴⁴ P. Kozakiewicz, *Klimat a drewno zabytkowe...*, s. 49.

⁴⁵ C.C. Gerhards, *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood an analysis of immediate effects*, U.S. Department of Agriculture, 1980

⁴⁶ PN-EN 1995-1-1:2010..., pkt 2.3.2.1.

Wieruszewski wykazał na podstawie badań własnych próbek sosny zwyczajnej z różnych rejonów, że wilgotność drewna wykazuje istotną zmienność zarówno na przekroju poprzecznym pnia (wyraźne różnice między białem a twardzielą oraz w kierunku promieniowym), jak i między drzewami rosnącymi w różnych warunkach siedliskowych. Zmienność ta ma znaczenie dla praktycznej oceny właściwości materiału po wbudowaniu w konstrukcję, gdyż wilgotność drewna w elemencie stopniowo wyrównuje się do poziomu wynikającego z mikroklimatu otoczenia⁴⁷.

Właściwości higroskopijne drewna iglastego: zdolność do pobierania i oddawania pary wodnej z otaczającego powietrza, powodują, że wilgotność drewna wbudowanego w przegrodę budowlaną jest wartością zmienną w czasie. Zjawisko to, nazywane jest sorpcją (przy pobieraniu pary) i desorpcją (przy jej oddawaniu).

W kontekście biernej ochrony przeciwpożarowej elementów z drewna litego iglastego zarówno właściwości mechaniczne w temperaturze normalnej, jak i ich zmiany pod wpływem podwyższonej temperatury oraz wilgotności tworzą zintegrowany obraz materiałowego zachowania drewna. Znajomość tych właściwości i rządzących nimi zależności stanowi punkt wyjścia do oceny skuteczności pasywnych środków ochrony, w tym osłon z tkanin technicznych, których zadaniem jest opóźnienie nagrzewania chronionego elementu i zachowanie jego nośności przez możliwie długi czas ekspozycji ogniowej.

2.2.5. Wpływ wilgotności, gęstości i struktury na zachowanie drewna w czasie pożaru

Drewno lite iglaste - podstawowy materiał konstrukcyjny polskiego budownictwa historycznego i współczesnego nie jest materiałem jednorodnym. Zachowanie tego materiału podczas ekspozycji ogniowej zależy od co najmniej trzech nakładających się grup czynników: gęstości, wilgotności oraz struktury wewnętrznej, przy czym czynniki te pozostają ze sobą wzajemnie powiązane. Zrozumienie tych zależności jest warunkiem koniecznym zarówno dla prawidłowej interpretacji wyników badań eksperymentalnych, jak i dla oceny skuteczności zewnętrznych systemów ochrony w tym osłon z tkanin technicznych stanowiących przedmiot niniejszej rozprawy.

⁴⁷ M. Wieruszewski, *Sosna zwyczajna...*, s. 64.

Gęstość właściwa stanowi jeden z najważniejszych parametrów fizycznych drewna, decydujący zarówno o jego właściwościach mechanicznych, jak i o przebiegu procesów termicznych w warunkach pożaru.

Wpływ gęstości na prędkość zwęglania drewna należy do zagadnień stosunkowo dobrze rozpoznanych, choć jego charakter jest złożony i ulega modyfikacji przez czynniki towarzyszące. Drewno gęstsze zwęгла się wolniej, mechanizm tego związku wynika co najmniej z trzech równoległych procesów termofizycznych.

Po pierwsze, wyższa gęstość objętościowa oznacza większą masę materiału palnego w jednostce objętości, co wymaga dostarczenia większej ilości energii do wytworzenia jednostkowej grubości warstwy węgla. Po drugie, przewodność cieplna drewna rośnie wraz z gęstością. Po trzecie, masa tracona w jednostce czasu rośnie wraz z gęstością, ponieważ masa komórkowa podlegająca pirolizie jest proporcjonalna do gęstości ścian komórkowych, niezależnie od wymiaru geometrycznego próbki⁴⁸.

Badania polskie dostarczają wartościowych danych uzupełniających. Sulik przeprowadził bezpośrednie pomiary prędkości zwęglania dziewięciu krajowych gatunków drewna, w tym sosny i świerku⁴⁹. Drewno sosnowe wykazało prędkość zwęglania o około 11% wyższą od świerkowego, przy czym wartości dla sosny mieściły się w przedziale 0,64 - 0,75 mm/min., w zależności od partii materiału, co Sulik powiązał między innymi ze zróżnicowaniem gęstości próbek⁵⁰. W opracowaniu przygotowanym przez A.I.Barletta oraz pozostałych autorów tego przekrojowego zestawienia potwierdzają znaczące różnice w szybkości zwęglania wprost powiązane z gęstością badanego gatunku drewna. Zestawienie oparte o wyniki badań kilku badaczy światowych⁵¹.

Przytoczone w cytowanym opracowaniu zestawienia badań analizujących wpływ gęstości drewna, na szybkość spalania potwierdza kierunek badań na polskim gruncie badawczym. Zwiększenie gęstości wpływa bezpośrednio na zmniejszenie szybkości zwęglania, jak przedstawiono poniżej.

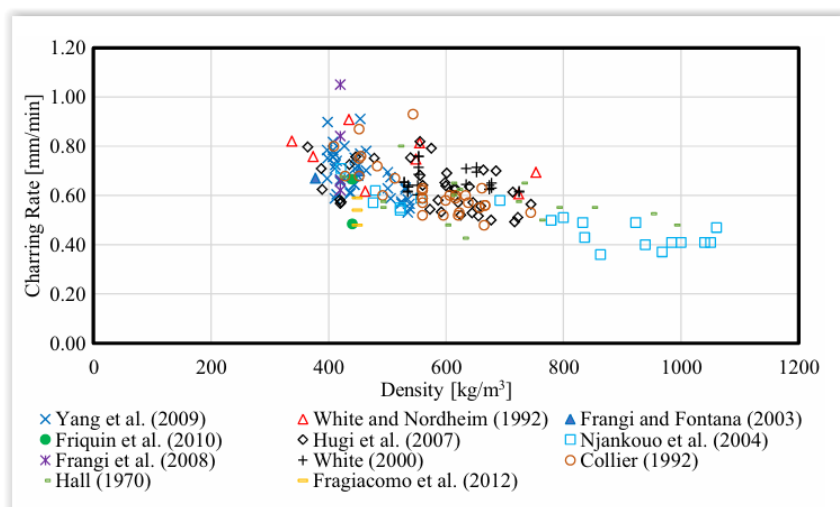
⁴⁸ A.I. Bartlett, *A review of factors affecting...*, s. 1-49.

⁴⁹ P. Sulik, *Prędkość zwęglania wybranych krajowych gatunków drewna*, „Materiały Budowlane”, nr 9, 2022, s. 99–102.

⁵⁰ Tamże, s. 100.

⁵¹ Tamże s. 1-49.

Wykres 2. Wykres prędkości zwęglania w funkcji gęstości dla testów według standardowej krzywej temperatura-czas



Źródło: A.I. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, *A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction*, „Fire Technology” 2019, vol. 55, nr 1, s. 18.

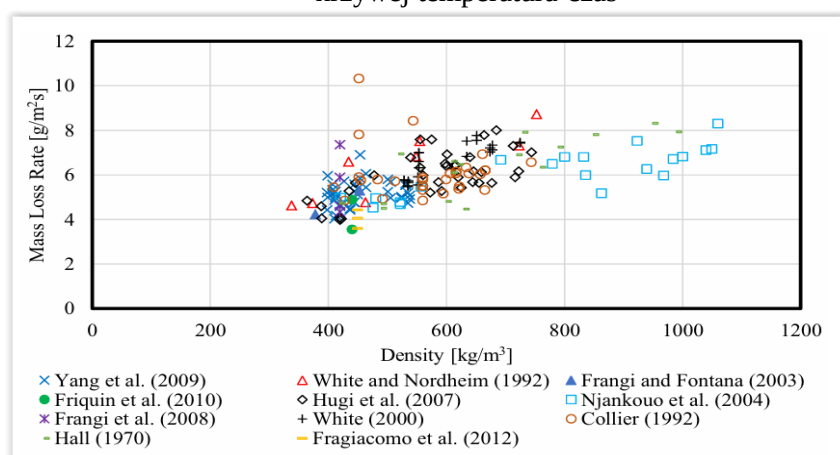
Na podstawie analizy wykresów prędkość ubytku masy rośnie dla gęstszych próbek. Zobrazowanie zależności przedstawiono na wykresie nr 3. Widać, że podczas gdy prędkość zwęglania słabo maleje z gęstością, prędkość ubytku masy, a tym samym ogólna piroliza, słabo wzrasta. Dlatego wkład palnych par z gęstszych próbek będzie większy⁵².

Niejednorodność strukturalna drewna iglastego ma kilka odrębnych wymiarów przestrzennych, z których każdy wpływa na progresję zwęglania w inny sposób. Krzysik opisuje gradient gęstości wzdłuż promienia pnia, wynikający ze stopniowego przejścia ze strefy drewna młodocianego do drewna dojrzałego, jako zjawisko powszechne w sosnowatych⁵³. Gradient ten oznacza, że profil głębokości zwęglania zmierzony eksperymentalnie na rdzeniu elementu i na jego obwodzie może się różnić, co komplikuje interpretację wyników prób znormalizowanych.

⁵² A.I. Bartlett, *A review of factors affecting...*, s. 1-49.

⁵³ F. Krzysik, *Nauka o drewnie*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1974, s. 84–88.

Wykres 3. Wykres prędkości ubytku masy w funkcji gęstości dla testów według standardowej krzywej temperatura-czas



Źródło: A.I. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, *A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction*, „Fire Technology” 2019, vol. 55, nr 1, s. 19

Witkowska i Lachowicz wykazały, że gęstość umowna drewna sosny zwyczajnej w polskich lasach różni się statystycznie między siedliskami: drewno z borów suchych wykazuje najwyższą gęstość, podczas gdy drewno z borów mieszanych, wilgotnych najniższy. Istotne znaczenie dla gęstości analizowanego gatunku ma też wiek drzewostanu, z którego pozyskano drewno. Różnice te przedstawiają się następująco dla sosny pozyskanej w borze świeżym w II klasie wieku to 387 kg/m³ dla drewna z pozyskanego w Lasach Iławskich to nawet 504 kg/m³ dla V klasy wieku⁵⁴.

Istotnym czynnikiem strukturalnym jest orientacja słoików rocznych względem ekspozowanej powierzchni. Friquin przytacza dane wskazujące, na różnice w szybkości zwęglania w zależności od układu słoików rocznych w odniesieniu do kierunku oddziaływania czynnika pożarowego, co wiąże się z różnicą w przewodności cieplnej wzdłuż i poprzecznie do osi cewek⁵⁵. W kontekście badań pracy fakt ten uzasadnia stosowanie jednolitego protokołu orientacji próbek względem źródła ciepła.

Oddzielnym zagadnieniem, ważnym przy ocenie drewna z obiektów zabytkowych, jest wpływ makroskopowych nieciągłości: sęków, kanałów żywicznych i pęknięć skurczowych. Tomczak i in. opisują sęki jako pierwotne zaburzenie jednorodności struktury tkankowej, obniżające miejscową wytrzymałość i modyfikujące przepływ

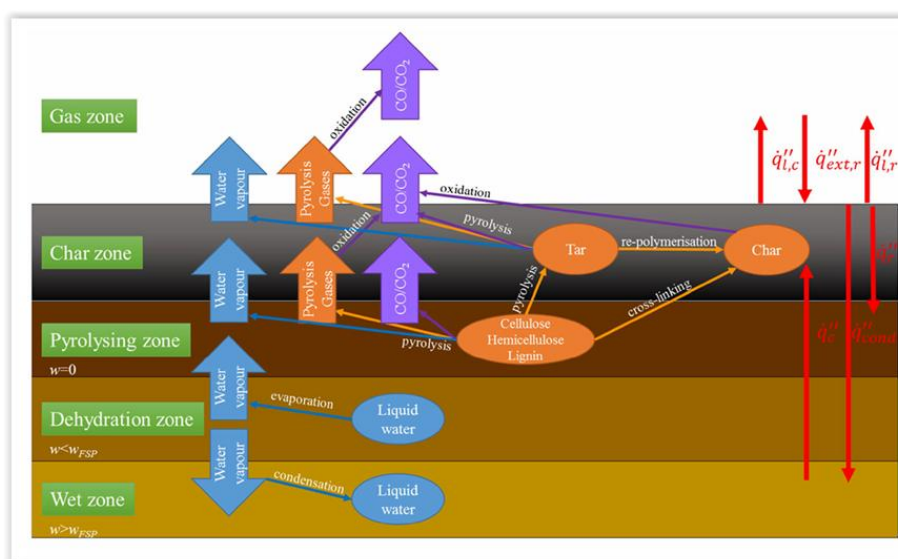
⁵⁴ J. Witkowska, H. Lachowicz, *Zmienność gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w zależności od wybranych czynników*, „Sylwan” 2013, vol. 157, nr 5, s. 336–347.

⁵⁵ K.L. Friquin, *Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber*, „Fire and Materials” 2011, vol. 35, nr 5, s. 303–327.

ciepła przez przekrój⁵⁶. Kanały żywiczne, charakterystyczne dla gatunków sosnowatych, są źródłem ekstraktów o wyższej wartości opałowej niż celuloza, zawartość żywicy w twardzieli sosny może sięgać 5,25% masy suchego drewna a dla bieli ok 4%⁵⁷.

Wilgotność drewna, a procesy termiczne w warunkach pożarowych

Mechanizm wpływu wilgotności na prędkość zwęglania jest dobrze udokumentowany. Woda zawarta w drewnie pochłania energię cieplną zarówno podczas podgrzewania (ciepło właściwe wody: 4,18 kJ/(kg·K)), jak i w trakcie odparowania (ciepło parowania: 2 260 kJ/kg). Przebiega tu wyraźna granica termiczna przy temperaturze około 100°C, w której front termiczny ulega chwilowemu spowolnieniu wskutek pochłaniania energii przez odparowanie wolnej wody, zjawisko to dokumentuje profil temperaturowy mierzony w próbkach drewna metodą termopar wewnętrznych. Przy tej temperaturze część wody migruje głębiej do próbki od źródła ciepła i kondensuje. Zjawisko to zwiększa lokalną wilgotność drewna oraz dzieląc próbkę na trzy obszary związane z procesami migracji i odparowanej wody⁵⁸.



Rysunek 1. Procesy chemiczne i fizyczne w próbce palącego się drewna⁵⁹

Przy niskich strumieniach ciepła odwodnienie i piroliza będą przebiegać niezależnie, a przy wyższych strumieniach ciepła będą zachodzić jednocześnie. Gdy

⁵⁶ A. Tomczak, W. Pazdrowski, T. Jelonek, W. Grzywiński, *Jakość drewna sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.). Część I. Charakterystyka wybranych cech i właściwości drewna wpływających na jego jakość*, „Sylwan” 2009, vol. 153, nr 6, s. 363–372.

⁵⁷ F. Krzysik, *Nauka o drewnie...*, s. 195.

⁵⁸ A.I. Bartlett, *A review of factors affecting...*, s. 16.

⁵⁹ Tamże, s.3.

odwodnienie i piroliza zachodzą jednocześnie, wilgoć spowalnia wzrost temperatury zazwyczaj do osiągnięcia 115°C, ponieważ dostarczona energia jest zużywana na parowanie zamiast na nagrzewanie i ochładza strefę pirolizy poprzez konwektywny przepływ masy pary wodnej. Woda związana jest zazwyczaj uwalniana później, w temperaturach około 240°C⁶⁰.

Bartlett w swoim opracowaniu cytuje badania, na podstawie których wskazano znaczący wpływ zawartości wilgoci w elemencie drewnianym na szybkość pirolizy. W zależności od wielkości próbki, rodzaju drewna badacze uzyskiwali różne wartości, jednak wpływ wilgoci został potwierdzony. Dla strumienia 50kW/m² prędkość zwęglania wahała się ok 0,8 mm/min dla 10% wilgotności do 0,64 mm/min przy 20% wilgotności wyniki badań Mikkola⁶¹. Na podstawie cytowanych badań przedstawiono empiryczną zależność wpływu wilgoci na prędkość zwęglania na podstawie wzoru:

$$\beta\alpha \frac{1}{1+2.5w} \quad (2)$$

gdzie w jest zawartością wilgoci (kg/kg). Zakłada to silną zależność od zawartości wilgoci, przy czym suche drewno zwęglą się o 25% szybciej niż drewno z 10% zawartością wilgoci i o 50% szybciej niż drewno z 20% zawartością wilgoci. Przedstawione w cytowanym opracowaniu wyniki wielu testów różnych badaczy w zakresie szybkości zwęglania w ujęciu zawartości wilgoci w próbce. Różne metody, gatunki drewna, poziomy wilgotności wskazują wspólny kierunek, jednak ustandaryzowanie tego tematu w tym obszarze jest raczej niemożliwe, a jedynie wskazuje wspólną zależność.

W badaniach, które przeprowadził Sulik, odnotowuje, że wilgotność próbek sosny wynosiła 11 - 13%, to wartość charakterystyczna dla drewna sezonowanego w warunkach normalnych⁶². Jednocześnie podkreśla, że przy interpretacji wyników prób normowych wilgotność początkową próbek należy traktować jako parametr kontrolny, a nie jako czynnik powtarzalny, gdyż zmienny wpływ wilgoci w różnych regionach i porach roku nieuchronnie wprowadza rozproszenie wyników⁶³.

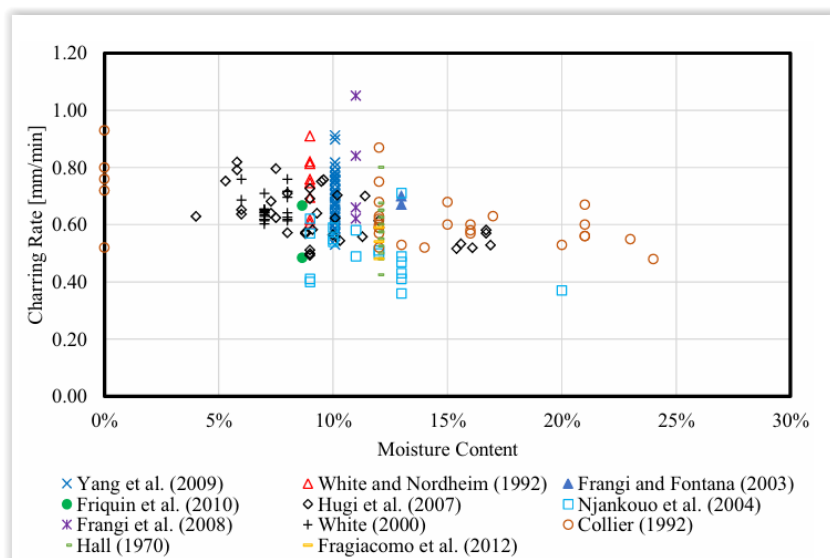
⁶⁰ A.I. Bartlett, A review of factors affecting..., s. 1-49.

⁶¹ A.I. Bartlett, A review of factors affecting..., s. 1-49.

⁶² P. Sulik, Prędkość zwęglania..., s. 101.

⁶³ Tamże, s. 100.

Wykres 4. Wykres tempo zwęglania w zależności od zawartości wilgoci dla standardowych testów krzywej czas–temperatura (z podziałem na badaczy)⁶⁴



Źródło: A.I. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction, „Fire Technology” 2019, vol. 55, nr 1, s. 22

2.2.6 Normowa prędkość zwęglania a rzeczywista zmienność parametrów materiałowych

Eurokod 5 przyjmuje dla drewna litego iglastego jednolity nominalny wskaźnik prędkości zwęglania $\beta_0 = 0,65$ mm/min jako wartość do stosowania w obliczeniach konstrukcji ekspozowanych na normową krzywą temperatury ISO 834 - 1:2025⁶⁵. Wartość ta pochodzi z uśrednienia wyników badań wielu gatunków iglastych i jest formułowana jako podejście zachowawcze z zapasem bezpieczeństwa, nie uwzględnia ani gęstości konkretnej tarcicy, ani jej wilgotności w chwili pożaru, ani lokalizacji, z jakiej części został pozyskany materiał. Przy innych wartościach gęstości materiału lub przy grubościach elementów mniejszych niż 20 mm prędkość zwęglania powinna zostać określona indywidualnie na podstawie wzoru z uwzględnieniem zależności poniżej.

$$\beta_{0,\rho,T} = \beta_0 k_p k_n \quad (3)$$

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (4)$$

⁶⁴ A.I. Bartlett, A review of factors affecting..., s. 1-49.

⁶⁵ PN-EN 1995-1-2:2008/AC:2009. Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: Postanowienia ogólne – Projektowanie konstrukcji na wypadek pożaru, pkt 3.4.2.

Gdzie ρ_k – gęstość charakterystyczna, w kg/m^3 , h_p – grubość okładziny w milimetrach

Szczegółowe wyniki badań światowych i polskich przedstawione w poprzednich podrozdziałach wskazują na dużą zmienność parametru szybkości zwęglania. W normie PN-EN 1995-1-2 przyjęto uśrednioną wartość odpowiadającą typowym warunkom materiału i wynikom badań laboratoryjnych. Rozbieżności ujawniają się przede wszystkim przy znacznych zmianach gęstości i zawartości wilgoci drewna. Należy jednak podkreślić, że kierunek emisji promieniowania, orientacja włókien czy miejsce pochodzenia materiału mają mniejsze znaczenie. Szczegółowa analiza jest wskazana dla mniej typowych gatunków drewna, a zwłaszcza dla tych, które już znajdują się w konstrukcji i których właściwości fizyczne i strukturalne zmieniły się znacząco w ciągu czasu.

Reasumując, gęstość, wilgotność i struktura drewna są wzajemnie powiązanymi parametrami materiałowymi, których łączny wpływ na prędkość zwęglania nie jest prostą sumą efektów cząstkowych. Normowy wskaźnik dla drewna litego iglastego o gęstości powyżej 290 kg/m^3 , $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ przyjęty w EN 1995-1-2 stanowi statystyczne przybliżenie konserwatywne, adekwatne dla typowego drewna iglastego o wilgotności eksploatacyjnej, lecz niedostatecznie precyzyjne w odniesieniu do materiałów o parametrach istotnie odbiegających od referencyjnych⁶⁶. Wysoka zmienność gęstości drewna w polskich warunkach siedliskowych, udokumentowana przez Witkowską i Lachowicza oraz przez Tomczaka i in., uzasadnia uwzględnienie tego parametru jako zmiennej towarzyszącej przy planowaniu programu badawczego^{67,68}.

2.3 Niejednorodność drewna litego jako materiału badawczego i jej konsekwencje dla standaryzacji wyników

Drewno lite iglaste stanowi jeden z niewielu materiałów budowlanych, którego właściwości fizykochemiczne i mechaniczne są wypadkową procesów biologicznych zachodzących w czasie wieloletniego wzrostu organizmu roślinnego. Z tego względu wykazuje ono zmienność strukturalną niemożliwą do wyeliminowania metodami technologicznymi stosowanymi przy produkcji materiałów syntetycznych. Makrostruktura drewna obejmująca układ słoików rocznych, szerokość twardzieli i bieli,

⁶⁶ PN-EN 1995-1-2:2008/AC:2009..., pkt 3.4.

⁶⁷ J. Witkowska, H. Lachowicz, *Zmienność gęstości umownej...*, s. 339.

⁶⁸ A. Tomczak, *Jakość drewna sosny zwyczajnej...*, s. 366–372.

oraz orientację włókien względem osi anatomicznej różni się istotnie między poszczególnymi gatunkami iglastymi, a nawet między osobnikami tego samego gatunku rosnącymi w odmiennych warunkach siedliskowych⁶⁹.

Zmienność ta bezpośrednio wpływa na trudności związane ze standaryzacją wyników badań. Obowiązujące normy europejskie, w tym PN-EN 14081-1, określają procedury pobierania próbek i oznaczania właściwości mechanicznych, jednak nie eliminują wpływu naturalnej heterogeniczności surowca na rozproszenie uzyskiwanych wyników⁷⁰. Szczególną rolę odgrywają tu sęki i pęknięcia, które w sposób nieproporcjonalnie silny obniżają powtarzalność badań dla danej serii próbek.

Zmienność właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), gatunku stanowiącego znaczący surowiec iglasty w polskim budownictwie drewnianym, jest dobrze udokumentowana w literaturze krajowej. Badania potwierdzają, że współczynnik zmienności gęstości pozornej w obrębie jednej lokalizacji pozyskania może znacznie się różnić między partiami, co generuje analogiczne rozproszenie parametrów wytrzymałościowych⁷¹.

Dodatkowym czynnikiem komplikującym interpretację wyników badań odporności ogniowej drewna jest jego wilgotność. Drewno jako materiał higroskopijny osiąga stan równowagi wilgotności zależny od temperatury i wilgotności względnej otoczenia. W warunkach laboratoryjnych wymaga to ścisłego kondycjonowania próbek. Wilgotność bezpośrednio wpływa na ciepło właściwe drewna, jego przewodność cieplną oraz prędkość zwęglania, powodując znaczące zmiany w przebiegu testów pożarowych.

Konsekwencje heterogeniczności drewna dla wyników rozprawy ujawniają się na dwóch płaszczyznach. Po pierwsze, wymaga to zastosowania licznej grupy próbek badawczych, umożliwiającej analizę statystyczną rozproszenia wyników i wyznaczenie wartości charakterystycznych. Po drugie, interpretacja wpływu osłon tekstylnych na parametry ogniowe elementów drewnianych wymaga uwzględnienia naturalnej zmienności surowca jako zmiennej zakłócającej, kontrolowanej jedynie poprzez właściwy dobór i kontrolę materiału doświadczalnego.

⁶⁹ M. Wieruszewski, *Klasyfikacja jakościowo-wytrzymałościowa drewna sosny zwyczajnej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2019.

⁷⁰ PN-EN 14081-1:2019, Konstrukcje drewniane - Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo – Część 1: Wymagania ogólne, PKN, Warszawa 2016.

⁷¹ J. Witkowska, *Zmienność gęstości umownej...* 336 - 347.

2.4. Fizykochemia spalania i piroliza drewna

2.4.1. Etapy termicznego rozkładu drewna

Zrozumienie procesu pirolizy drewna jest kluczowe dla nauki bezpieczeństwa pożarowego. Piroliza drewna stanowi przedmiot badań zarówno w kontekście spalania, jak i niebezpiecznych zjawisk pożarowych. Proces ten bezpośrednio warunkuje dynamikę rozprzestrzeniania się ognia w elementach drewnianych wbudowanych w obiekt i stanowi istotny element w modelowaniu zagrożenia pożarowego.

Odpowiedź termiczna drewna na oddziaływanie ciepła przebiega przez sekwencję ściśle powiązanych procesów. W literaturze przedmiotu wyróżnia się pięć zasadniczych etapów degradacji termicznej drewna: suszenie, pirolizę właściwą, zapłon mieszaniny palnych gazów pirolizy, spalanie płomieniowe oraz żarzenie pozostałości węglowej⁷².

Suszenie (do około 100 - 115°C)

Drewno w warunkach naturalnych zawiera wodę w dwóch formach: wodę wolną, wypełniającą jamki komórkowe oraz wodę związaną, zaadsorbowaną w ścianach komórkowych. Wilgotność równoważna drewna eksploatowanego w obiektach budowlanych wynosi zazwyczaj od 8 do 18%, zależnie od warunków środowiskowych⁷³.

Gdy temperatura powierzchni drewna wzrasta do wartości zbliżonych do 100°C, zachodzi intensywne odparowanie wody wolnej. Proces ten pochłania znaczne ilości energii cieplnej, entalpia parowania wody wynosi 2257 kJ/kg, co spowalnia wzrost temperatury wewnątrz przekroju elementu⁷⁴. Zjawisko to ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ część energii dostarczanej przez źródło ciepła jest konsumowana na odparowanie wilgoci zamiast na podwyższanie temperatury drewna i inicjowanie pirolizy.

W zakresie temperatur 100 - 115°C następuje dalsze usuwanie wody związanej strukturalnie. Ponieważ dostarczona energia jest zużywana na parowanie zamiast na nagrzewanie, ochładza strefę pirolizy poprzez konwektywny przepływ masy pary wodnej. Dla drewna zabytkowego, w którym wilgotność bywa niejednorodna wskutek długotrwałej historii ekspozycji środowiskowej, front odparowania może tworzyć

⁷² A.I. Bartlett, A review of factors affecting..., s. 3.

⁷³ F. Krzysik, Nauka o drewnie, PWN, Warszawa 1975, s. 285–288.

⁷⁴ Tamże., s. 7.

wewnętrzne nieciągłości cieplne istotne dla modelowania rozkładu temperatury w przekroju⁷⁵.

Norma EN 1995-1-2 przyjmuje, że izotermę odpowiadającą granicy strefy pirolizy wyznacza temperatura 300°C, punkt ten stanowi efektywną granicę zachowania nośności⁷⁶.

Piroliza właściwa (120 - 300°C)

Piroliza właściwa to endotermiczny proces chemicznego rozkładu składników drewna pod wpływem ciepła, zachodzący bez udziału tlenu lub przy jego ograniczonym dostępie. Główne składniki strukturalne drewna: celuloza (40 - 50%), hemiceluloza (20 - 35%) oraz lignina (15 - 30%) wykazują odmienne zakresy temperaturowe rozkładu, co nadaje procesowi pirolizy charakter wieloetapowy i rozciągnięty w czasie⁷⁷.

W literaturze opisywany jest też przedział pirolizy w niskich temperaturach, tj. poniżej 200°C, a produktem tego procesu jest uwalnianie głównie niepalnych substancji lotnych jak dwutlenek węgla, kwasy mrówkowe i octowe.

Hemiceluloza jest zazwyczaj pierwszym składnikiem drewna, który ulega termicznemu rozkładowi. Zakres temperatur, w jakim się rozpoczyna, jest bardzo szeroki w zależności od parametrów, takich jak prędkość nagrzewania, gęstość, zawartość wilgoci czy gatunku i jest w przedziale temperatur w zależności od badań od 120°C - 300°C⁷⁸. Celuloza jest kolejnym składnikiem, który rozkłada się w procesie pirolizy, a jej rozkład przebiega intensywnie w zakresie 240°C - 400°C, wytwarzając lewoglukozę i w dalszej reakcji przechodzą w palne gazy⁷⁹.

Lignina, jako najbardziej złożony polimer aromatyczny w strukturze drewna, ulega rozkładowi w szerokim zakresie temperatur od około 110°C do powyżej 500°C. Powstałe gazy zapalają się, a powstający dym jest efektem spalania wydzielonej smoły. Jak przedstawiają badacze, powyżej 300°C następuje intensyfikacja procesu pirolizy⁸⁰.

W fazie pirolizy właściwej wyodrębnia się dwa konkurencyjne szlaki reakcji: rozkład na palne gazy i ciecze (depolimeryzacja) oraz tworzenie węgla drzewnego

⁷⁵ A.I. Bartlett, A review of factors affecting..., s. 8.

⁷⁶ PN-EN 1995-1-2:2008/AC:2009. Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: Postanowienia ogólne – Projektowanie konstrukcji na wypadek pożaru,

⁷⁷ Tamże.

⁷⁸ Tamże.

⁷⁹ Tamże.

⁸⁰ Tamże s. 13–15.

wskutek reakcji kondensacji i aromatyzacji (karbonizacja). Proporcje między tymi szlakami zależą od szybkości ogrzewania, większa szybkość sprzyja powstawaniu lotnych produktów, natomiast wolna piroliza tworzeniu węgla⁸¹.

2.4.2. Zwęglanie - prędkość karbonizacji i warstwa ochronna

Produktem trwałym pirolizy drewna jest warstwa węgla drzewnego (*char*), która powstaje na powierzchni elementu i pełni funkcję naturalnej bariery termicznej. Przewodność cieplna węgla drzewnego jest znacznie niższa niż drewna niezniszczonego.

Integralność warstwy węglowej jest warunkiem jej skuteczności jako bariery termicznej. Zjawiskiem osłabiającym tę barierę jest spękanie (*cracking*), tworzenie się prostopadłych do powierzchni szczelin, przez które ciepło może przenikać w głąb elementu z pominięciem zwartej struktury węgla. Prędkość karbonizacji wzrasta wskutek spękań, co prowadzi do przyspieszenia destrukcji elementu. Zjawisko to jest szczególnie istotne w elementach historycznych, w których istniejące spękania skurczowe i sęki stanowią gotowe drogi penetracji ciepła.

Zapłon: inicjacja trwałego spalania może nastąpić w trybie zapłonu pilotowanego (obecność zewnętrznego źródła zapłonu) lub samorzutnego (gdy temperatura gazów pirolizy osiąga wartość wystarczającą do samozapłonu). Babrauskas, w swoim przeglądzie poświęconym zapłonowi drewna⁸², usystematyzował wyniki kilkudziesięciu badań, wskazując na różnice w temperaturze zapłonu pilotowego i temperaturze zapłonu samorzutnego. Wartości te są zależne od strumienia ciepła, gatunku i wilgotności drewna

⁸¹ M. Nagrodzka, D. Małozieć, *Impregnacja drewna środkami ogniochronnymi*, Bezpieczeństwo i Technika Ratownicza, 2011.

⁸² V. Babrauskas, *Ignition of Wood: A Review of the State of the Art*, Fire Protection Engineering, 2002.

oraz, co zostało bardzo dobrze przedstawione, od wielkości próbki poddanej badaniu. Jak można zauważyć, rozbieżności są znaczne.

Year	Investigator	Spec. size	Ignition temperature (°C)		Comments
			Piloted	Auto-ignition	
1887	Hill [2]	0.5–15 g		220–300	measured air temperature near sample
1910	Bixel, Moore [3]	35 mm ?		200–250	measured oven temperature; scant details
1922	Banfield, Peck [4]	50 × 50 × 200 mm		302–308	measured surface temperature
1934	Brown [5]	1–5 g		220–250	measured oven temperature; tiny samples; unsound ignition criterion
1936	VanKleeck [6]	chips		235	measured specimen temperature; unsound ignition criterion
1947	NIST [7]	shavings		228–264	softwood shavings in test tube; criterion – glowing or flaming
1949	Graf [8]	7–13 g		232–245	measured oven temperature; tiny samples; unclear ignition criterion
1949	Angell et al. [9]	13 × 19 × 51 mm		204	measured gas temperature close to specimen
1950	Fons [10]	2–9 mm cylinders		343	measured oven temperature; solved inverse problem
1958	Narayanamurti [11]	?	228		measured oven temperature
1959	Thomas et al. (data of Prince, 1915) [12]	32 × 32 × 102 mm	210		measured oven temperature; solved inverse problem
1959	Akita [13]	20 × 20 × 1.8 mm	450 < 350	489	measured oven temperature; solved inverse problem
1960	Simms [14]	8 mm ϕ		545	measured oven temperature only calculated from correlation, not measured
1960	Moran [15]	50 × 50 × 6.4 mm		<u>255</u>	at flux = 25 kW m ⁻² ; measured surface temperature
1961	Patten [16]	3 g shavings	260	260	measured oven temperature (Setchkin test)

Table 1. Continued.

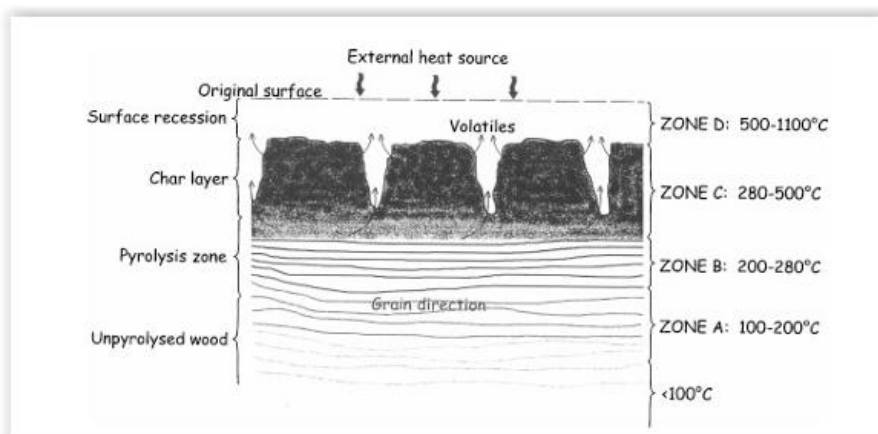
Year	Investigator	Spec. size	Ignition temperature (°C)		Comments
			Piloted	Autoignition	
1961	Buschman [17]	57 × 57 × 8 mm	<u>369</u>		calculated from correlation; fluxes 14.3–37.2 kW m ⁻²
1964	Shoub, Bender [18]	920 × 920 mm		<u>254</u>	measured surface temperature
1964	Tinney [19]	≥ 6 mm ϕ		350	measured oven temperature
1967	Simms, Law [20]	76 × 76 × 19 mm	380		calculated from correlation
1967	Muir [21]	80 × 160 mm	<u>364–384</u>		measured surface temperature; flux range 15–25 kW m ⁻²
1967	Koohyar [22]	100 × 100 × 12–19 mm	<u>361</u>	<u>402</u>	measured surface temperature; flux range 18–35 kW m ⁻² (piloted), 32–35 kW m ⁻² (autoignition)
1969	Melinek [23]	100 × 100 × 13 mm	<u>353</u>	<u>382</u>	calculated from correlation
1969	Jach [24]	few grams		260–290	measured oven temperature
1970	Smith and King [25]	75 × 75 × 19 mm	<u>350</u>	<u>413–714</u>	temperatures measured by optical pyrometry; autoignition values dubious
1983	Atreya [26]	64 mm ϕ × 19 mm	<u>370</u>		temperatures measured, but below surface; flux = 18 kW m ⁻²
			<u>350</u>		temperatures measured, but below surface; flux ≥ 30 kW m ⁻²
1986	Atreya et al. [27]	75 × 75 × 19 mm	<u>330–405</u>		temp. measured, but below surface
1988	Abu-Zaid [28]	150 × 75 × 37 mm	<u>420</u>		forced-air flow; temp. measured but below surface; flux = 18.5 kW m ⁻²
			<u>350</u>		forced-air flow; temp. measured but below surface; flux > 25 kW m ⁻²
			<u>530</u>		flux = 40 kW m ⁻²
1991	Janssens [29]	100 × 100 × 17 mm	<u>300–364</u>		surface temp. measured; fluxes 25–35 kW m ⁻²
1992	Li, Drysdale [30]	64 × 64 × 18 mm	<u>411–497</u>		temp. measured but below surface; flux < 20 kW m ⁻²
1993	Masařik [31]	2.5 g	<u>353–397</u> 220–240		temp. measured but below surface; flux > 20 kW m ⁻²
1996	Fangrat et al. [32]	100 × 100 mm	<u>296–330</u>		tested wood fiberboard; measured oven temperature (Setchkin test)
1997	Moghtaderi et al. [33]	100 × 100 × 19 mm	<u>332</u> <u>297</u>		surface temp. measured; fluxes ≥ 25 kW m ⁻²
					temp. measured but below surface; at 20 kW m ⁻²
					temp. measured but below surface; at 60 kW m ⁻²

? = unknown measurements; **Bold** = Type 1 values (see text below); Underline = Type 2 values (see text below).

Rysunek 2. Temperatury zapłonu drewna⁸³

⁸³ V. Babrauskas, *Ignition of Wood: A Review...*, s. 165-167.

Spalanie płomieniowe: po zapłonie gazy lotne spalają się w fazie gazowej, generując płomień dyfuzyjny ponad powierzchnią drewna. Część ciepła generowanego przez płomień jest przekazywana z powrotem do powierzchni, co podtrzymuje pirolizę. Płomień drewna osiąga temperatury rzędu 800 - 1100°C, co zapewnia intensywne promieniowanie cieplne z powrotem w kierunku powierzchni materiału, tworząc samopodtrzymujące sprzężenie między pirolizą a spalaniem. Ciepło przekazywane z płomienia do powierzchni drewna przez promieniowanie i konwekcję utrzymuje prędkość pirolizy na poziomie umożliwiającym ciągłą emisję palnych gazów.



Rysunek 3. Strefy temperatury w przekroju poprzecznym litego drewna narażonego na działanie ognia.⁸⁴

Żarzenie (spalanie bezpłomieniowe): Gdy strumień gazów lotnych spadnie poniżej wartości krytycznej, płomień gaśnie, a spalanie przechodzi w tryb żarzenia w bezpośredniej utleniającej reakcji heterogenicznej na powierzchni węgla drzewnego. Żarzenie może trwać bardzo długo po wygaśnięciu płomienia i stanowi istotne zagrożenie w kontekście ponownego spalania płomieniowego. Proces żarzenia jest szczególnie ważny z punktu widzenia działalności operacyjnej straży pożarnej. Proces bez ingerencji jest długotrwały, wpływający na dalszą degradację warstwy nośnej drewna, a z drugiej strony trudnej do zlokalizowania ze względu na brak oznak spalania płomieniowego łatwego do identyfikacji lokalizacji w strefie spalania.

2.4.2. Produkty spalania i ich wpływ na środowisko pożaru

Spalanie drewna generuje złożoną mieszaninę produktów, której skład zależy od temperatury, dostępności tlenu i szybkości nagrzewania. Głównymi produktami spalania zupełnego są dwutlenek węgla (CO₂) i para wodna (H₂O). W warunkach pożarowych,

⁸⁴ K.L. Friquin, *Material properties...*;303-327

cechujących się niezupełnym spalaniem wskutek niedoboru tlenu, przeważają produkty niepełnego utleniania, w tym tlenek węgla (CO), główny toksyczny składnik gazów pożarowych, aldehydy, lotne związki organiczne oraz cząstki stałe sadzy.

Gdy strumień gazów pirolizy spadnie poniżej wartości krytycznej, płomień gaśnie, a spalanie przechodzi w fazę żarzenia bezpośredniej, heterogenicznej, utleniającej reakcji na powierzchni węgla drzewnego. Żarzenie może trwać bardzo długo po wygaśnięciu płomieni i stanowi istotne zagrożenie w kontekście ponownego zapłonu spalania płomieniowego. Proces żarzenia jest szczególnie ważny z punktu widzenia operacyjnego straży pożarnej, ponieważ trwa długo i prowadzi do dalszej degradacji warstwy nośnej drewna, a jednocześnie jest trudny do zlokalizowania ze względu na brak widocznych oznak spalania płomieniowego.

2.5. Zwęglanie drewna litego – podejście normowe

2.5.1. Metoda przekroju resztkowego wg PN-EN 1995-1-2

Norma *PN-EN 1995-1-2:2008*, polska wersja europejskiej normy projektowania ogniowego konstrukcji drewnianych przewiduje dwie zasadnicze metody obliczeniowe pozwalające na wyznaczenie nośności elementu drewnianego poddanego ekspozycji ogniowej: metodę przekroju resztkowego oraz metodę przekroju zredukowanego⁸⁵. Obie metody opierają się na koncepcji szybkości zwęglania, lecz różnią się sposobem uwzględnienia osłabienia drewna w strefie przyległej do powierzchni zwęglonej.

Metoda przekroju resztkowego

Metoda przekroju resztkowego (*residual cross-section method*)⁸⁶ zakłada, że nośność elementu jest wyznaczana wyłącznie przez wymiary geometryczne przekroju pozostałego po odjęciu warstwy zwęglonej bez jakiegokolwiek uwzględnienia degradacji właściwości mechanicznych drewna w strefach bezpośrednio graniczących z warstwą zwęgloną.

Głębokość zwęglania efektywnego wyznaczana jest na podstawie prędkości zwęglania β_0 oraz czasu ekspozycji ogniowej t , zgodnie z zależnością:

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t \quad (5)$$

⁸⁵ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5,

⁸⁶ Tamże.

gdzie:

$d_{char,0}$ – obliczeniowa głębokość zwęglania dla zwęglania jednokierunkowego

β_0 -obliczeniowa prędkość zwęglania jednokierunkowego w warunkach pożaru standardowego

t - czas oddziaływania pożaru.

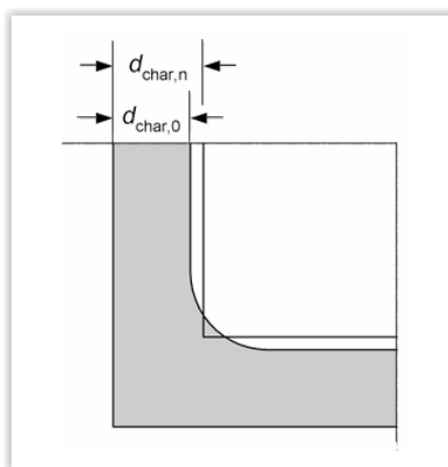
Warto zauważyć, że zależność ta jest obowiązująca dla jednokierunkowego zwęglania. W najczęstszej sytuacji, z jaką spotykamy się w czasie rzeczywistych warunków pożarowych, to zwęglanie z uwzględnieniem zaokrąglenia narożników. W takich przypadku stosujemy zależności jak niżej.

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (6)$$

gdzie:

$d_{char,n}$ hipotetyczna głębokość zwęglania, uwzględniająca wpływ zaokrąglenia narożników

β_n – obliczeniowa prędkość zwęglania z uwzględnieniem wpływu na zaokrąglenia narożników oraz szczelin.



Rysunek 4. Głębokość zwęglania $d_{char,0}$ dla zwęglania jednokierunkowego oraz hipotetyczna głębokość zwęglania $d_{char,n}$ ⁸⁷

⁸⁷ PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, str. 23.

Tabela 2. Wartości obliczeniowe prędkości zwęglania β_n i β_0 drewna, LVL, okładzin drewnianych i płyt drewnopochodnych

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Drewno iglaste i bukowe		
Drewno klejone warstwowo o gęstości charakterystycznej $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Drewno lite o gęstości charakterystycznej $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Drewno liściaste		
Drewno lite lub klejone warstwowo o gęstości charakterystycznej 290 kg/m^3	0,65	0,7
Drewno lite lub klejone warstwowo o gęstości charakterystycznej $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5	0,55
c) LVL		
o gęstości charakterystycznej $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Płyty		
Okładziny drewniane	0,9 ^a	–
Sklejka	1,0 ^a	–
Płyty drewnopochodne inne niż sklejka	0,9 ^a	–

^a Wartości odnoszą się do gęstości charakterystycznej 450 kg/m^3 i grubości płyt co najmniej 20 mm; dla innych gęstości i grubości patrz 3.4.2(9).

Źródło: PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, op. Tablica 3.1

Obliczeniowa jednokierunkowa prędkość zwęglania może być zastosowana pod warunkiem uwzględnienia wzrostu prędkości zwęglania w narożnikach, dla elementów przekroju poprzecznym z minimalną szerokością początkową, b_{min} , gdzie⁸⁸

$$b_{min} = \begin{cases} 8,15d_{char,0} & d_{char,0} \geq 13 \text{ mm} \\ 2d_{char,0} + 80 & d_{char,0} < 13 \text{ mm} \end{cases} \quad (7)$$

Wartości prędkości zwęglania β_0 dla poszczególnych gatunków drewna litego określa tablica 3.1 normy EN 1995-1-2. Dla sosny pospolitej (*Pinus sylvestris*) i świerku pospolitego (*Picea abies*) przyjmuje się $\beta_0 = 0,8 \text{ mm/min}$, przy gęstości charakterystycznej co najmniej 290 kg/m^3 .

Istotą metody jest przyjęcie pełnych, charakterystycznych wartości wytrzymałości i sztywności drewna dla przekroju pomniejszonego o warstwę $d_{char,0}$. Obszar drewna o grubości $d_{char,0}$ jest traktowany jako całkowicie niezdolny do przenoszenia naprężeń i eliminowany z obliczeń bez żadnego współczynnika redukcyjnego. Pozostały rdzeń przekroju netto obliczany jest z pełnymi parametrami materiałowymi klasy drewna.

Metoda przekroju resztkowego jest dopuszczalna w normie do stosowania jako samodzielna procedura obliczeniowa dla elementów poddanych ekspozycji ogniowej wg

⁸⁸ PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, wzór 3.2.

krzywej standardowej. Jej zaletą jest prostota obliczeniowa, wymaga wyłącznie znajomości głębokości zwęglenia i geometrii przekroju⁸⁹. Wadą jest nadmierny konserwatyzm: metoda pomija realny wkład nośny drewna w strefie pirolizy, co prowadzi do zaniżania szacowanej odporności ogniowej, szczególnie przy długich czasach ekspozycji. Ponadto zakłada ściśle wartości zwęglenia z podziałem tak naprawdę na liściaste i iglaste, a w nich tylko dwie kategorie gęstości. Dla standardowego podejścia jest to duże uproszczenie jednak przy dokładnej analizie np. dostępnych badaniach potwierdzających dokładną gęstość czy prędkość zwęglania nie daje możliwości podejścia jednostkowego.

Metoda przekroju zredukowanego

Metoda przekroju zredukowanego (*reduced cross-section method*) stanowi podejście dokładniejsze, uwzględniające gradient osłabienia właściwości mechanicznych drewna w strefie granicznej między warstwą węgla a nienaruszonym rdzeniem⁹⁰.

Zgodnie z tą metodą, do głębokości zwęglenia wyznaczonej z prędkości β_0 dodaje się dodatkową warstwę o grubości $k_0 = 7$ mm, określaną jako warstwa zera wytrzymałości (*zero-strength layer*). Efektywna głębokość karbonizacji przyjmowana do obliczeń wynosi zatem:

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 k_0 \text{ przy czym } d_0 = 7 \text{ mm} \quad (8)$$

$d_{char,n}$ = określenie zgodnie z wyrażeniem (3.2) normy PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5 lub zasadami podanymi w 3.4.3 cytowanej normy, k_0 podano w tabeli nr poniżej cytowanej w normie Eurokod 5.

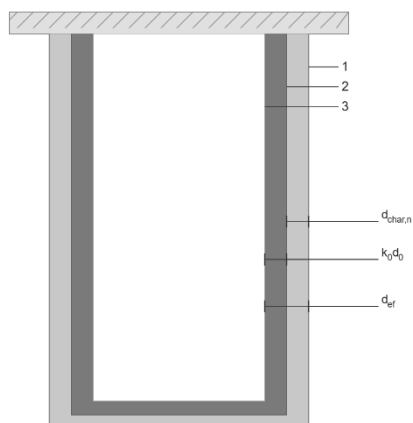
Tabela 3. Określenie k_0 powierzchni niezabezpieczonych, t w minutach wraz z uwzględnieniem tabeli poniżej z tej samej normie

	k_0
$t < 20 \text{ min}$	$t/20$
$t \geq 20 \text{ min}$	1,0

Źródło: PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, Tablica 4.1

⁸⁹ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode pkt 4.2.3

⁹⁰ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, pkt 4.2.3, wzór (4.2)

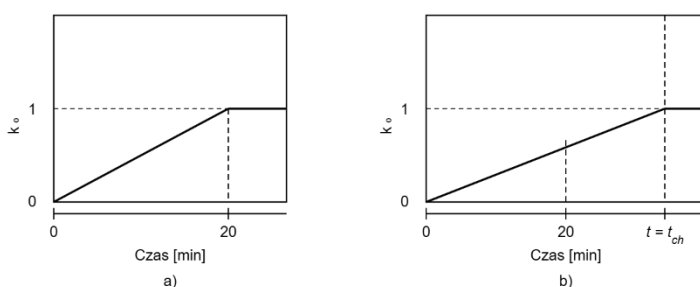


Objaśnienia:

1. Początkowy przekrój poprzeczny elementu, 2. Granica szczątkowego przekroju poprzecznego,
3. Granica efektywnego przekroju poprzecznego

Rysunek 5. Definicja szczątkowego i efektywnego przekroju poprzecznego⁹¹.

Wykres 5. Przebieg zmienności k_0 : a) dla niezabezpieczonych elementów i zabezpieczonych, przy $t_{ch} \leq 20$ minut, b) dla zabezpieczonych elementów, przy $t_{ch} > 20$ minut



Źródło: PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, Rysunek 4.2. Opracowanie własne

Warstwa o grubości $k_0 = 7$ mm symuluje efekt termicznego osłabienia drewna w strefie pirolizy i suszenia, gdzie materiał zachowuje jeszcze strukturę geometryczną, ale traci istotną część wytrzymałości wskutek degradacji termicznej składników polimerowych celulozy, hemiceluloz i ligniny⁹². Strefa ta obejmuje drewno w zakresie temperatur 100 - 300°C.

Dla przekroju resztkowego pomniejszonego o warstwę d_{ef} norma zezwala na przyjęcie pełnych, charakterystycznych wartości wytrzymałości i sztywności odpowiadających temperaturze otoczenia. Oznacza to, że inaczej niż w metodzie ogólnej

⁹¹ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, Definicja 4.1.

⁹² Tamże.

z rozdziału 4.3 normy nie stosuje się współczynników redukcyjnych zależnych od temperatury. Efektywny przekrój netto, po odjęciu d_{ef} pracuje z pełnymi parametrami materiałowymi⁹³.

Metodę przekroju zredukowanego stosuje się do elementów poddanych ekspozycji ogniowej wg standardowej krzywej pożarów naturalnych opisanych krzywymi parametrycznymi, dla których możliwe jest określenie ekwiwalentnego czasu ekspozycji. Metoda ta jest rekomendowana przez normę jako bardziej reprezentatywna od metody przekroju resztkowego, zwłaszcza dla elementów poddanych wielostronnej ekspozycji ogniowej⁹⁴.

Różnice metodologiczne i praktyczne implikacje

Fundamentalna różnica między obiema metodami polega na sposobie traktowania drewna w strefie bezpośrednio przylegającej do warstwy węgla-zwęglenia. Metoda przekroju resztkowego zakłada ostry, geometryczny podział przekroju na dwie strefy: całkowicie zniszczoną warstwę d_1 oraz w pełni sprawny rdzeń.

Metoda przekroju zredukowanego koryguje ten brak przez wprowadzenie umownej warstwy o zerowej wytrzymałości $d_0 = 7$ mm, która w uproszczony, lecz skuteczny sposób uwzględnia efekt termicznego osłabienia drewna w strefie pirolizy⁹⁵. Warstwa ta nie odpowiada żadnej fizycznie wyznaczalnej granicy temperatury, lecz stanowi parametr zapewniający spójność wyników obliczeń z rezultatami badań ogniowych.

W praktyce projektowania ogniowego konstrukcji drewnianych metoda przekroju zredukowanego daje wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistej nośności resztkowej elementu. Metoda przekroju resztkowego może być stosowana jako szybka, bezpieczna, górna ocena czasu, po którym element traci wymaganą nośność, lecz systematycznie zaniża odporność ogniową w stosunku do wyników uzyskiwanych metodą dokładniejszą⁹⁶.

Z perspektywy projektowania biernej ochrony termicznej za pomocą tkanin technicznych z włókna szklanego, obie metody mają bezpośrednie zastosowanie do wyznaczenia wymaganego czasu ochrony. Skuteczna osłona termiczna powinna opóźniać postęp frontu zwęglenia w taki sposób, aby suma głębokości zwęglenia i

⁹³ P. Sulik, W. Skowroński, *Odporność ogniowa...*, część I, s. 14–15.

⁹⁴ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5

⁹⁵ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5., pkt 4.2.3

⁹⁶ Tamże.

ewentualnej warstwy k_0 nie osiągnęła wartości krytycznej dla wymaganej nośności przez założony czas odporności ogniowej⁹⁷.

2.6. Podsumowanie rozdziału – wnioski dla dalszych badań

Przegląd piśmiennictwa przedstawiony w tym rozdziale obejmuje zarówno klasyczne pozycje monograficzne i normowe, jak i najnowsze prace, w tym ważne polskojęzyczne opracowania dotyczące krajowych gatunków drewna. Przegląd ten pozwala na sformułowanie syntetycznych wniosków stanowiących fundament teoretyczny dalszych etapów badań.

Po pierwsze, zachowanie pożarowe drewna litego iglastego jest procesem złożonym, obejmującym sprzężone zjawiska suszenia, pirolizy, zapłonu, spalania płomieniowego, żarzenia i formowania warstwy zwęglonej. Każdy z tych etapów ma swoje podłoże w zmienności drewna, takie jak gęstość, wilgotność i zmiany powierzchniowe.

Po drugie, warstwa zwęglona pełni kluczową rolę ochronną wobec rdzenia elementu, co stanowi istotną różnicę mechanizmu utraty nośności drewna od stali. Wszelkie rozwiązania techniczne opóźniające przepływ ciepła do drewna w tym tkaniny techniczne jako osłony biernej wydłużają czas zachowania nośności ogniowej chronionego elementu.

Po trzecie, normowe metody projektowania ogniowego (metoda przekroju resztkowego i metoda zredukowanych właściwości wg PN-EN 1995-1-2)⁹⁸, stanowią narzędzia uproszczone, oparte na założeniu stałej prędkości zwęglania i ekspozycji na krzywą standardową. Literatura wskazuje, że w warunkach pożarów niestandardowych założenia te mogą być niewystarczające, co podkreśla znaczenie badań poligonowych prowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, realizowanych w niniejszej pracy. Dodatkowo cytowane opracowania światowe wskazują znaczne rozbieżności w szacunkach prędkości zwęglania, nie uwzględniając innych zmiennych opisanych wcześniej.

⁹⁷ PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5

⁹⁸ Tamże.

Po czwarte, niejednorodność drewna litego, szczeliny radialne⁹⁹, zmienność gęstości stawia istotne ograniczenia przed standaryzacją wyników i wymaga ostrożności w ekstrapolacji danych laboratoryjnych na elementy pełnowymiarowe.

Powyższe rozważania tworzą solidną podstawę dla programu badawczego. Zastosowanie wybranych tkanin technicznych jako osłon biernych elementów z drewna litego iglastego ma na celu opóźnienie inicjacji pirolizy, spowolnienie postępu frontu zwęglania i w konsekwencji wydłużenie okresu zachowania nośności ogniowej chronionego elementu. Efektywność takiego rozwiązania zależy od właściwości termicznych tkaniny, jej integralności mechanicznej w warunkach pożarowych oraz interakcji z warstwą węglową drewna.

⁹⁹G. Harun, *The effects of radial ...*, s. 386–399.

ROZDZIAŁ 3. METODY BIERNEJ OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ KONSTRUKCJI DREWNIANYCH – STAN WIEDZY, MECHANIZMY DZIAŁANIA I OGRANICZENIA

Bierna ochrona przeciwpożarowa (ang. passive fire protection) stanowi jeden z dwóch filarów bezpieczeństwa pożarowego obiektów budowlanych. W przeciwieństwie do ochrony czynnej, opartej na systemach detekcji i gaszenia z wykorzystaniem instalacji stałych, rozwiązania pasywne działają automatycznie, bez udziału zasilania elektrycznego lub ręcznej aktywacji. Ich zasadniczą funkcją jest opóźnienie lub ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia, dymu i ciepła, umożliwiając ewakuowanie użytkowników, zapewnienie bezpieczeństwa obiektu przez założony czas oraz skuteczną interwencję służb ratowniczych.

Rozwiązania pasywne mają bardzo duże znaczenie dla bezpieczeństwa pożarowego, ponieważ dobrze zaprojektowane i wykonane spełniają swoją funkcję przez długie lata, a nawet przez cały okres eksploatacji budynku. W odróżnieniu od zabezpieczeń czynnych, których niezawodność determinuje wiele czynników w tym niezawodność komponentów, prawidłowość przeglądów konserwacyjnych i czynnik ludzki, na które mamy ograniczony wpływ podczas eksploatacji budynku.

Doświadczenia autora z praktyki zawodowej wskazują na wiele przypadków, w których nieprawidłowo konserwowany system pożarowy lub świadomie wyłączony (bądź zablokowany) przez użytkownika na przykład podczas prac remontowych, nie zapewnił wymaganego poziomu bezpieczeństwa pożarowego, co skutkowało małymi lub większymi pożarami w takim obiekcie.

W przypadku drewnianych elementów konstrukcyjnych bierna ochrona ma szczególne znaczenie ze względu na palność materiału oraz postępujące zwęglenie prowadzące do utraty nośności. Znamiennym przykładem jest pożar katedry Notre Dame w 2019 roku, który mimo wczesnego wykrycia przez system detekcji pożaru rozprzestrzenił się tak szybko, że nie można go było opanować, zanim przeszedł do fazy nieodwracalnego zniszczenia. Cała więźba drewniana dachu uległa zniszczeniu, co ilustruje powagę zagrożenia. Liczne, historyczne elementy drewniane, które przetrwały wielowiekową eksploatację, uległy bezpowrotnemu zniszczeniu w wyniku pożaru spowodowanego pracami remontowymi.

Norma PN-EN 1995-1-2 (Eurokod 5, część 1-2), opiera się na modelu obliczeniowym liniowego postępu frontu zwęglania, opisanego prędkością β_0 [mm/min]. Wszystkie metody ochrony mają na celu ograniczenie szybkości zwęglania, choć mechanizmy działania są różne. Współczesne systemy ochrony drewnianych elementów konstrukcyjnych dzielą się na trzy główne grupy: impregnacje, powłoki pęczniące oraz okładziny. Poszczególne metody zostaną w dalszej części pracy omówione, ze wskazaniem ich zalet i wad z perspektywy skuteczności ochrony pożarowej, aspektów ekonomicznych i technicznych.

3.1. Klasyfikacja metod biernej ochrony – mechanizmy i kryteria oceny

3.1.1. Systematyka metod – podział funkcjonalny i mechanizmowy

Metody biernej ochrony przeciwpożarowej drewna klasyfikuje się według dwóch głównych kryteriów: mechanizmu działania oraz zakresu ochrony. Według kryterium mechanizmu wyróżnia się metody *chemiczne* modyfikujące przebieg pirolizy przez wprowadzenie substancji czynnych do struktury drewna oraz metody *fizyczne*, tworzące barierę termiczną między źródłem ciepła a chronionym elementem.

Metody chemiczne obejmują impregnację ciśnieniową i powierzchniową; ich efektem jest przede wszystkim redukcja palności, opóźnienie degradacji struktury i wydłużenie czasu, w którym element spełnia założone parametry w warunkach pożaru. Metody fizyczne okładziny, powłoki i osłony działają jako bariera termiczna, spowalniając nagrzewanie rdzenia drewna i opóźniając inicjację zwęglania¹⁰⁰.

3.1.2. Rozróżnienie: reakcja na ogień (reaction to fire) a nośność ogniowa (fire resistance)

Dla praktyki inżynierskiej fundamentalne jest rozróżnienie między wpływem zabezpieczenia reakcji na ogień (*reaction to fire*), a jego wpływem na nośność ogniową (*fire resistance*). Pierwsze pojęcie opisuje zachowanie materiału w początkowej fazie pożaru: podatność na zapłon, prędkość rozprzestrzeniania płomienia, intensywność wydzielania ciepła oraz wydzielanie dymu. Drugie określa zdolność elementu do zachowania wymaganej funkcji przez określony czas przy ekspozycji na pożar normowy.

¹⁰⁰ P. Sulik, *Wpływ impregnacji na prędkość zwęglania drewna klejonego krzyżowo*, Materiały budowlane nr 5, s.14-19.

Impregnacja ogniochronna poprawia przede wszystkim reakcję na ogień, lecz ma ograniczony wpływ na nośność ogniową, środki ogniochronne nie eliminują procesu zwęglania, a jedynie go modyfikują¹⁰¹. Okładziny i powłoki pęczniące działają jako bariery termiczne i mają bezpośredni wpływ na prędkość zwęglania, a zatem na kryterium R nośności ogniowej. Rozróżnienie to ma kluczowe znaczenie dla właściwej interpretacji wyników badań i formułowania wymagań projektowych¹⁰². Zachowanie ciągłości powłoki i osłony jest fundamentalnym wymaganiem dla zapewnienia parametru opisanego powyżej. Nawet miejscowe niespełnienie wymagania przez system okładzin czy natrysku, pęknięcia odspojenia warstwy pęczniącej wpływają negatywnie na parametr (R) całego elementu. Nie możemy wtedy mówić o lokalnym obniżeniu poziomu zabezpieczenia, a o braku tego zabezpieczenia. W odróżnieniu od impregnacji, która stopniowo utraci swoje właściwości spowalniające proces pirolizy w miarę pogłębiania się frontu zwęglania, do momentu, gdy zwęglanie dociera do warstw, w które impregnat nie przedostał się ze względu na ograniczoną penetracyjność środka i porowatość drewna.

3.2. Impregnacja ogniochronna – mechanizm, skuteczność i ograniczenia

3.2.1. Mechanizm działania środków ogniochronnych w postaci impregnatów – wpływ na prędkość zwęglania i parametry techniczne drewna

Impregnacja ogniochronna polega na wprowadzeniu substancji chemicznych do struktury drewna w celu modyfikacji jego zachowania termicznego. Najczęściej stosowane środki to: dwuwodorofosforan amonu ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), boran sodu ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), kwas borowy (H_3BO_3), chlorek cynku (ZnCl_2), siarczan amonu $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, wodorofosforan amonu $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$ oraz mieszaniny siarczanu i fosforanu amonu (stosunek masowy 80:20). Dobór składnika aktywnego determinuje mechanizm ochrony i zakres jego skuteczności^{103,104}.

Mechanizm działania środków ogniochronnych jest wielotorowy: (1) składniki fosforanowe katalizują dehydratację celulozy i hemicelulozy, prowadząc do tworzenia zwartej, mniej reaktywnej warstwy węgla zamiast lotnych produktów pirolizy; (2) składniki azotanowe uwalniają gazy rozcieńczające (N_2 , NH_3), obniżając stężenie tlenu w strefie płomienia; (3) sole fosforanowe tworzą izolacyjną, szklaną warstwę ochronną

¹⁰¹ M. Nagromadzka, *Impregnacja drewna środkami...*, s. 69-75.

¹⁰² PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5

¹⁰³ Tamże.

¹⁰⁴ H. Sivrikaya, M. Wu, H. Militz, *Fire resistance of Scots pine modified with sorbitol, citric acid and fire retardants*, European Journal of Wood and Wood Products, t. 83, nr 1, 2025, s.126 -127.

na powierzchni zwęglonego drewna; (4) głębokość penetracji środka do struktury drewna decyduje o czasie efektywnej ochrony – zasadniczo ograniczonej do zewnętrznej strefy elementu.

Poziom skuteczności impregnacji ogniochronnej elementów drewnianych zależy od bardzo wielu zmiennych. Warto zauważyć, że główny element to składnik czynny w środku zabezpieczającym. Odpowiada on za poziom ograniczenia zwęglenia oraz na trwałość powłoki w czasie, co nie jest bez znaczenia przy długim okresie eksploatacji i jasno określonych w dokumentacji obszarów zastosowań. Wpływ zmian temperaturowych oraz czynniki środowiskowe wpływają w różnym stopniu na degradację powłok, których skuteczność po czasie jest trudno weryfikowalna bez specjalistycznych badań. Wspomniane warunki środowiskowe jak wilgoć, ma szczególne znaczenie dla impregnatów nietworzących bariery hydrofobowej na granicy materiał-otoczenie. Szeroko opisywane w literaturze znaczenie dla trwałości w czasie drewna ma zawartość wilgoci w strukturze materiału jak i w przestrzeniach, gdzie ono jest użytkowane. Bez dokładnej analizy przed zastosowaniem środka impregnującego może spowodować przyspieszenie degradacji jego struktury.¹⁰⁵ Stosowanie drewna jako materiału konstrukcyjnego połaci dachowej jest obarczone dużym prawdopodobieństwem wystąpienia w dłuższym okresie możliwych zawilgoceń czy przecieków, w znaczący sposób degradując zastosowany impregnat. Przykładem są impregnaty bardzo popularne na polskim gruncie budowlanym na bazie soli nieorganicznych. Kluczowym elementem jest też poprawność doboru systemu i poprawności wykonania impregnacji danego elementu. Przedstawiony w dokumentacji jednego z producentów impregnatów ogniochronnych kluczowy element to grubość powłoki, która determinuje czas, przez który następuje opóźnienie procesu zwęglania w stosunku do elementu niezabezpieczonego.

¹⁰⁵ P. Kozakiewicz, M. Matejak, *Klimat a drewno zabytkowe...*

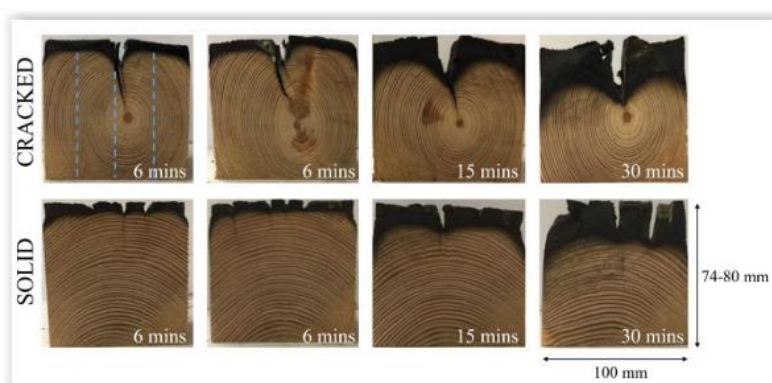
Tabela 4. Zabezpieczenie belek i słupów impregnatem ogniochronnym, porównanie parametrów

Lp.	Produkt	Ilość materiału zabezpieczającego o g/m ²	Stosunek prędkości zwęglania k_{β}	Czas do uszkodzenia materiału ogniochronnego [min]
1	PROMADUR®	1120	0,71	17
2	PROMADUR®	468	0,57 [15 min]	13
3	PROMADUR®	181	0,86 [15 min]	7

Źródło: Opracowanie własne na podstawie materiałów technicznych firmy PROMAT [20.04.2026]

Warto podkreślić, że prezentowane wartości są danymi teoretycznymi. Należy jednak pamiętać o specyfice materiału podlegającego zabezpieczeniu. Drewno, szczególnie w obiektach użytkowanych przez długi okres, wykazuje liczne wady charakterystyczne dla tego materiału: pęknięcia, rozwarstwienia i inne odkształcenia, które bezpośrednio wpływają na efektywność zabezpieczenia danego elementu.

Badania dotyczące głębokości zwęglania, a w szczególności różnic dla elementów zawierających wady, potwierdzają znaczące ograniczenia w tym zakresie oraz dużą niejednorodność wyników w rzeczywistych warunkach eksploatacji¹⁰⁶.



Rysunek 6. Porównanie głębokości zwęglania elementu litego oraz z naturalnymi pęknięciami¹⁰⁷

Przedstawione na rysunku nr sześć różnice w głębokości zwęglania elementu litego oraz elementu z naturalnymi pęknięciami charakterystycznymi dla drewna wskazują na ewentualne miejsca, w których impregnacja powierzchniowa nie zawsze może być skuteczna lub trudna do zweryfikowania w zakresie naniesienia wymaganej ilości materiału czynnego. Wymagania w obiektach zabytkowych o dużej wartości materialnej

¹⁰⁶ G. Harun, *The Effects of Radial Cracks ...*, s. 1-27.

¹⁰⁷ Tamże s. 19.

i historycznej, proces doboru środka impregnującego są ściśle analizowany wraz ze specjalistami od prac konserwatorskich. Jednak nie zawsze mamy możliwość lub nie ma takiego wymogu formalnego, aby konsultacja w tym zakresie była obowiązkowa dla innych obiektów. Prace budowlane w obiektach wieloletnich nierzadko nie są objęte ochroną konserwatorską, a ich realizacja dotyczy zmiany przeznaczenia na przykład przekształcenia powierzchni wcześniej nieużytkowej na mieszkalną. Na rysunku nr 7 pochodzącego z materiału technicznego dostawcy systemu impregnacji ogniochronnej, przedstawiono ilustrującą rzeczywistej realizacji. Widoczny jest zabezpieczony element więźby dachowej z charakterystycznymi pęknięciami wzdłużnymi. Znacząca jest również obecność łącznika stalowego w pełni odsłoniętego. W obszarze połączenia rozkład temperatur będzie całkowicie odmienny niż w pozostałej części elementu, co skutkuje znacząco większymi głębokościami zwęglania. Właśnie takie szczegóły, choć na pozór nieistotne, mają wpływ na rzeczywistą skuteczność systemu impregnacji.



Rysunek 7. Elementy więźby dachowej zabezpieczone impregnatem, informacje z dokumentacji technicznej jednego z producentów systemów ogniochronnych¹⁰⁸

Problem łączników stalowych jako części konstrukcji drewnianej w warunkach pożaru jest szeroko omówiony w Eurokodzie 5 i jak zostało to wskazane, ma bardzo duże znaczenie w trwałości konstrukcji w ujęciu nośności pożarowej¹⁰⁹.

Oddzielnym zagadnieniem, które w materiałach handlowych i technicznych oraz kartach systemu jest pomijane, to wpływ danego środka impregnującego na wyjściowe parametry mechaniczne zabezpieczanego elementu. Badania przeprowadzone dla elementów zabezpieczonych roztworem SiO₂ wykazały pogorszenie właściwości

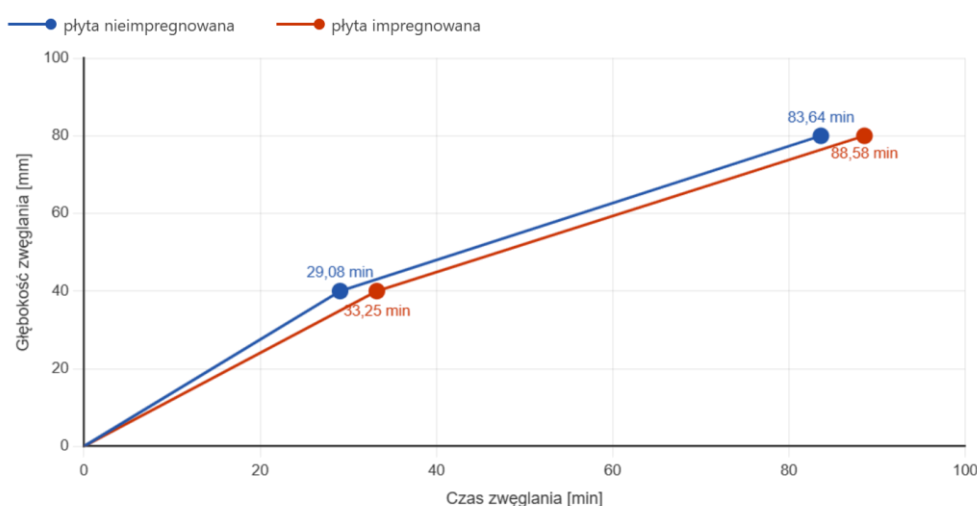
¹⁰⁸ Promat - broszura Promadur_2025.11.05.indd [20.04.2026].

¹⁰⁹ PN-EN 1995-1-2:2008 Projektowanie konstrukcji drewnianych Część 1-2.

wytrzymałościowych w warunkach pracy na ściskanie wzdłuż włókien. Natomiast po ekspozycji w podwyższonych temperaturach nie wykazano pozytywnego wpływu wykonanej impregnacji na ten parametr¹¹⁰.

Badania prędkości zwęglania impregnowanych płyt CLT przeprowadzone przez Sulika (2022) dla sosny bielastej wykazały różnicę czasu zwęglania na głębokość 80 mm: dla płyty impregnowanej – 88,58 min, dla nieimpregnowanej – 83,70 min. Różnica 4,88 min jest praktycznie pomijalna¹¹¹. Sytuacja jest bardziej złożona dla topoli: głębokość zwęglania 40 mm osiągano dla płyty impregnowanej po 39 min, a dla nieimpregnowanej po 24,58 min – różnica 14,42 min we wczesnej fazie pożaru ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa, jednak różnica ta zaciera się przy głębokości zwęglania 80 mm do ok. 4 min.

Wykres 6. Wpływ na prędkość zwęglania płyty z sosny bielastej (impregnat na bazie soli)

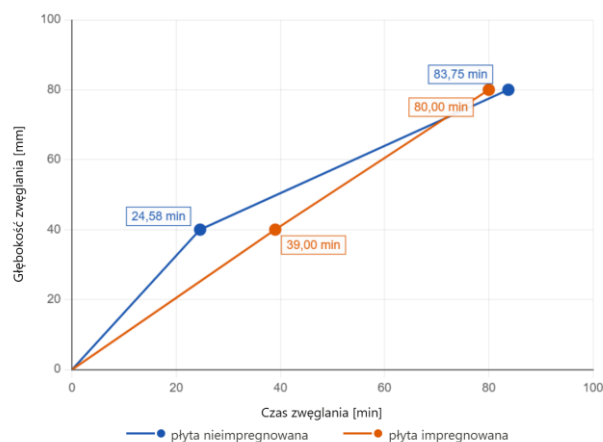


Źródło: P. Sulik. Wpływ impregnacji na prędkość zwęglania drewna klejonego krzyżowo. Materiały Budowlane nr 621, 2024

¹¹⁰ P. Ogrodnik, D. Pieniak, A. Krzyżak, A. Walczak. *Badanie wpływu podwyższonej temperatury na wytrzymałość na ściskanie drewna sosnowego impregnowanego środkiem ogniochronnym zawierającym SiO₂* Vol 33. Wydawnictwo CNBOP-PIB 2014.

¹¹¹ P. Sulik. *Wpływ impregnacji na prędkość...*

Wykres 7. Wpływ na prędkość zwęglania płyty z drewna topoli
(impregnat na bazie soli)



Źródło: P. Sulik. Wpływ impregnacji na prędkość zwęglania drewna klejonego krzyżowo. Materiały Budowlane nr 621, 2024

Warto zauważyć, że przedstawione badania wskazują tylko na pewne właściwości dla danego obszaru, nie można ich generalizować. Jednak zostały one tak dobrane, aby wskazać duże rozbieżności w skuteczności zastosowanych środków. Od praktycznie znikomych do znaczącego wpływu w początkowej fazie pożaru. Należy podkreślić, że zasadniczym elementem jest rodzaj drewna, który nawet przy tym samym środku determinuje jego skuteczność w całym wachlarzu realizowanego zabezpieczenia elementu drewnianego w warunkach pożaru.

Aby środek impregnujący prawidłowo pełnił swoje zdanie w zakresie modyfikacji szybkości zwęglania, musi prawidłowo wnikać w głąb struktury zabezpieczanego elementu. Zatem wilgotność zabezpieczanego elementu wprowadza dużą zmienność, nie bez znaczenia jest kolejny raz przytaczana specyfika materiału, jakim jest drewno, ponieważ punkt nasycenia włókien jest różny dla różnych gatunków, a nawet dla różnych części, z których został pozyskany surowiec¹¹², zatem kolejna zmienna do analizy.

Impregnacja ogniochronna nie może być traktowana jako metoda zapewniająca wymaganą nośność ogniową (R30, R60) elementów drewnianych. Penetracja środka ogniochronnego do drewna litego iglastego metodą próżniowo - ciśnieniową jest ograniczona do kilku kilkunastu milimetrów poniżej powierzchni. A w obiektach istniejących ta metoda praktycznie nie jest do zastosowania. Pozostaje tylko nanoszenie

¹¹² P. Kozakiewicz, *Klimat a drewno zabytkowe...*

powierzchniowe, które nie daje możliwości tak głębokiego wnikięcia impregnatu w głąb zabezpieczanego materiału, podczas gdy obliczeniowa głębokość zwęglania przy ekspozycji trwającej 30 min wynosi dla sosny $\beta_0 \cdot t = 0,8 \cdot 30 = 24$ mm. Rdzeń elementu pozostaje zatem niezabezpieczony chemicznie, nie jest to uproszczenie dla zwęglania jednokierunkowego. Nie analizujemy tu innych zmiennych np. różnic w głębokości zwęglania w narożach elementu ¹¹³.



Rysunek 8. Zmiany w rozkładzie temperatur – drewno lite¹¹⁴

Dodatkowe ograniczenie dotyczy zastosowań w obiektach zabytkowych. Wiele środków ogniochronnych zawiera sole fluorkowe, kwas borowy i związki fosforanowe, które mogą wchodzić w reakcje z historycznym drewnem, zmieniać jego właściwości sorpcyjne i barwę oraz są trudne lub niemożliwe do usunięcia. Zastosowanie impregnacji wobec zabytkowych elementów drewnianych wymaga uzyskania zgody konserwatora zabytków i szczegółowego uzasadnienia, a nierzadko jest wykluczone. W cytowanym rozporządzeniu na jego samym początku w §1. czytamy, że prace, które mogłyby naruszyć substancję zabytkową lub zmienić jej wygląd, wymagają uzyskania pozwolenia na te prace¹¹⁵. A jak pokazuje doświadczenie autora, znaczna większość środków, które stosował do impregnacji drewna w mniejszy czy większy sposób zmieniają jego wygląd zewnątrz, wprost wypełniając zapis cytowanego paragrafu.

¹¹³ PN-EN 1995-1-2 str. 22

¹¹⁴ G. Harun, *The effects of radial cracks*

¹¹⁵ Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dn 2 sierpnia 2018 r. W sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, prac restauratorskich i badań konserwatorskich przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków albo na Listę Skarbów Dziedzictwa oraz robót budowlanych, badań architektonicznych i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków, a także badań archeologicznych i poszukiwań zabytków. Dz.U.2018 poz. 1609.

3.2.2 Okładziny ochronne elementów drewnianych – ochrona prze pirolizą

Okładziny z płyt gipsowo-kartonowych (GK) i gipsowo-włóknowych (GKF), krzemianowo wapienne czy inne stanowią najbardziej powszechną metodę zabezpieczenia ogniochronnego elementów drewnianych w budownictwie europejskim. Mechanizm ochrony opiera się na dwóch komplementarnych procesach cieplnych. W zakresie 100 - 120°C gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pochłania energię cieplną w procesie endotermicznej dehydratacji do półhydratu ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Przy dalszym wzroście temperatury (180 - 200°C) następuje kolejny etap dehydratacji do anhydrytu (CaSO_4). Porowata ceramiczna masa pozostała po dehydratacji tworzy barierę termiczną o niskiej przewodności cieplnej, opóźniając dopływ ciepła do chronionego elementu, mechanizm typowy dla płyt gipsowych.

Wullschleger i Wakili (2008) w numerycznym badaniu parametrycznym wykazali, że efektywna przewodność cieplna płyty gipsowej jest silnie zależna od temperatury: w zakresie 20 - 100°C $\lambda \approx 0,27 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, przy ok 220°C spada do ok. 0,14 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ wskutek dehydratacji, a powyżej 700°C ponownie rośnie do wartości ok. 0,26 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ wskutek formowania porowatej ceramiki i utrzymuje się dalej do temp 1000°C¹¹⁶. Mechanizmem ochronnym płyt nie tylko o rdzeniu gipsowym jest ograniczenie przewodności cieplnej w różnym stopniu. Wymagane grubość przegrody ma istotne znaczenie dla spełnienia parametru opóźnienia zwęglenia powierzchni zabezpieczanego elementu.

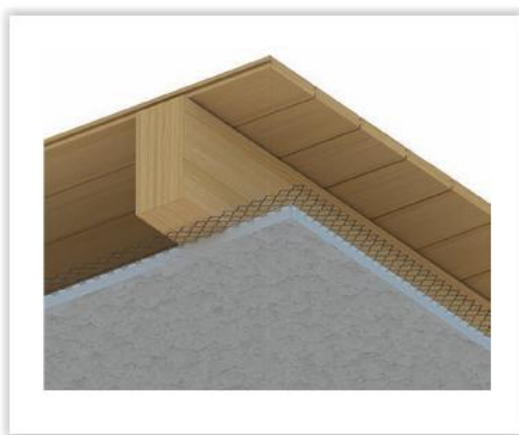
Dostępne na rynku płyty najczęściej wykorzystywane do zabezpieczenia elementów drewnianych posiadają parametry odpowiadające wskazanym powyżej. Typowy parametr podany w dokumentacji dla płyty gipsowo - kartonowej OgieńPlus $\lambda \approx 0,25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, a dla typowej płyty krzemowo - wapiennej $\lambda \approx 0,27 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Procedury certyfikacji zabezpieczeń drewnianych elementów określa norma *PN-EN 13381-7*, regulująca wyznaczanie czasu spadku okładziny (*fall-off time*), skuteczności ochrony termicznej oraz klasyfikacji wyrobu.

Warto zauważyć, że oprócz samych płyt możemy też spotkać w obrocie handlowych systemy dedykowane do zabezpieczenia np. stropów drewnianych w postaci natrysków ogniochronnych. W odróżnieniu od sztywnych obudów istnieje możliwość w

¹¹⁶ L. Wullschleger, K.G. Wakili, Numerical parameter study of the thermal behaviour of a gypsum plaster board at fire temperatures. Fire end material no 32, 2008 str. 103-119.

dużo lepszym stopniu dopasować zabezpieczenie do elementu, który ochramiamy. Aby zapewnić poprawny współczynnik przyczepności i trwałość powłoki wykorzystuje się jako zbrojenie siatkę cięto - ciągnioną. Przykładowa minimalna grubość końcowej powłoki to 59 mm. Jest ona wykonywana przez kilkukrotny natrysk. Deklarowane zapotrzebowanie produktu to ok 3,5 - 4 kg/m² dla grubości 10mm¹¹⁷. Współczynnik przewodności cieplnej to $\lambda \approx 0,078 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.



Rysunek 9. Natrysk ogniochronny na siatkę cięto-ciągnioną (zabezpieczenie stropu drewnianego)¹¹⁸

Chorlton i in. (2019) wykazali eksperymentalnie, że sposób połączenia i mocowania okładziny ma istotny wpływ na efektywność ochronną, zarówno czas, jak i jednorodność pola temperaturowego na powierzchni chronionego elementu drewnianego zależą od rozstawu i rodzaju łączników¹¹⁹. Jak każde rozwiązanie ma swoje mocne i słabe strony. W zakresie wykorzystania płytowania, w zależności jaką klasę chcemy zapewnić dla chronionego elementu, występują rozwiązania z pojedynczą płytą lub układ wielopłytowy. Dostępne rozwiązania oparte są o bezpośrednie mocowanie płyt do chronionego elementu lub z wykorzystaniem podkonstrukcji jako stelaż dla płyty osłonowej. Należy podkreślić, że trwałość systemu w warunkach pożaru zależy od poprawności wykonania płytowania. Niedopuszczalne są jakiekolwiek pęknięcia, rozwarstwienia i ubytki w szczególności w rozwiązaniach z pojedynczym płytowaniem i mocowaniem bezpośrednio do konstrukcji. Drewno, w szczególności jako element konstrukcyjny, cały czas cechuje się swoimi niepowtarzalnymi właściwościami.

¹¹⁷ www.PR_katalog_2026_a8_01_wstep_A4.indd [20.04.2026].

¹¹⁸ Promat - broszura stropy drewniane 2025.11.26.indd str.24. [20.04.2026].

¹¹⁹ B. Chorlton, B. Forrester, J. Gales, B. Wackman, *Performance of type X gypsum board on timber to non-standard fire exposure*, Fire and Materials, 2019.

Podatność na zmiany wilgotności, powstawanie naturalnych wad jak pęknięcia, skręcenia, wyboczenia jako efekt pozyskania drewna np. w okresie wzmożonej wegetacji. Takie zjawiska, które nie są rzadkością a wręcz normą w drewnie litym powodują, że w trakcie eksploatacji sztywne osłony ulegają pęknięciom, tworząc naturalne pole do głębszej penetracji lokalnej chronionego elementu. Nie mówiąc już o skrajnych przykładach odspojen płyt wskutek obciążeń zmiennych jak wiatr, śnieg.

Stosowanie okładzin ochronnych napotyka na szereg ograniczeń technicznych. Standardowa płyta GKF gr. 12,5 mm charakteryzuje się masą powierzchniową ok. 10 kg/m². Płyta krzemianowo - wapienna gr. 18 mm stosowana jako rozwiązanie systemowe do obudowy słupów drewnianych ma masę 15,6 kg/m². Podane wartości dotyczą wyłącznie elementu płytowego, bez systemu montażowego, który przy elementach drewnianych o nierównomiernej geometrii jest często niezbędny. Przy konieczności zabezpieczenia rozległych powierzchni złożonej więźby dachowej, znaczące zwiększenie obciążeń działających na chroniony ustrój nośny może być niemożliwe do zrealizowania bez ingerencji w układ konstrukcyjny.



Rysunek 10. Elementy więźby dachowej kościoła Mariackiego w Krakowie

– opracowanie własne

Sztywność płyt utrudnia ich stosowanie na elementach zakrzywionych i w konfiguracjach geometrycznie złożonych bez specjalnych systemów montażowych lub docinania elementów. Jest to szczególnie uciążliwe w zabytkowych więźbach np. kościelnych i pałacowych, gdzie elementy posiadają nieregularne wymiary przekrojów i historyczne połączenia ciesielskie.

Kolejnym istotnym ograniczeniem jest tzw. praca drewna, zmiana wymiarów spowodowanych wahaniami wilgotności. Drewno lite iglaste kurczy się i pęcznieje sezonowo, natomiast okładzina gipsowa, jako materiał nieorganiczny i nieelastyczny, nie nadąża za tymi ruchami. Kozakiewicz i Matejak (2013) dokumentują amplitudy sezonowych zmian wymiarów drewna zabytkowego w polskich warunkach klimatycznych, wskazując na ich bezpośredni związek z postępem degradacji mechanicznej połączeń w historycznych więźbach¹²⁰.

Zasadniczą wadą szczelnych obudów jest ograniczenie naturalnej wymiany powietrza wokół chronionego elementu. W warunkach pożaru produkty pirolizy (CO, CH₄, węglowodory aromatyczne) gromadzą się w przestrzeni między drewnem a okładziną, tworząc palne mieszanki gazowe. Ich nagłe uwolnienie i zapłon w momencie utraty szczelności okładziny może prowadzić do gwałtownych skoków intensywności pożaru. To zagrożenie jest jednak praktycznie nieanalizowane w dostępnej literaturze.

Ponadto historyczne elementy drewniane, które w normalnych warunkach poddawane były naturalnej wymianie gazowej, zostaną zamknięte w szczelnych obudowach. Może to przyspieszyć niekorzystne procesy biologiczne: zawilgocenie i gnicie, ponieważ obudowa utrudnia odprowadzanie wilgoci. Biologiczna degradacja drewna jest szeroko opisywana w literaturze, a w przypadku szczelnych obudów nabiera dodatkowego znaczenia.

Poza wymienionymi wcześniej ograniczeniami warto wskazać na aspekty ekonomiczne i techniczne. Dostępne płyty gipsowe, ze względu na standaryzację procesu technologicznego, oferowane są w kilku standardowych wymiarach. Wymaga to znacznego nakładu pracy w celu dostosowania osłon do konkretnych wymiarów każdego elementu, co istotnie zwiększa koszty zabezpieczenia. Ponadto przy zabezpieczaniu skomplikowanych elementów, takich jak więźba dachowa, powstaje znaczna ilość odpadów. W kontekście rosnącej dbałości o środowisko i redukcji śladu węglowego,

¹²⁰ P. Kozakiewicz, *Klimat a drewno zabytkowe...*

ograniczenie generowania odpadów na etapie przygotowania zabezpieczenia ma duże znaczenie społeczno-ekonomiczne.

Przedstawiane proste schematy montażowe w kartach technicznych i folderach reklamowych bardzo często napotykają na wspomniany problem, jakim jest poprawne wykonanie zabezpieczenia z płyt w ciasnych przestrzeniach lub w kolizji z innymi elementami - instalacjami w obiekcie. Poważnym ograniczeniem jest również wspomniana waga elementów wykorzystywanych do zabezpieczenia nie tylko w kontekście dodatkowego obciążenia dla konstrukcji, ale utrudnieniem w dostarczeniu i montażu takich płyt na dużych wysokościach i w ciasnych przestrzeniach. Ten problem przy wykonywaniu zabezpieczenia płytami jest praktycznie pomijalny.

Na podstawie przedstawionych właściwości techniczno - użytkowych obudowy posiadają pozytywne cechy w zakresie zabezpieczenia elementów drewnianych, ale też bardzo dużą ilość ograniczeń i wad bardzo znaczących i wpływających na możliwe obszary zastawania.

W obiektach chronionych konserwatorsko: kościołach, zamkach, dworach, spichrzach, stosowanie ciężkich i sztywnych okładzin gipsowych jest z reguły wykluczone ze względów estetycznych i konserwatorskich. Okładziny zakrywają historyczne elementy i uniemożliwiają bieżącą kontrolę wizualną stanu chronionego drewna. Zgodnie z regulacjami *Ustawy z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami* (Dz.U. z 2022 r. poz. 840) oraz rozporządzenia Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dnia 2 sierpnia 2018 r. (Dz.U. 2018 poz. 1609), każda ingerencja w substancję zabytkową wymaga uzasadnienia minimalizującego inwazyjność.

W większości elementów drewnianych o dużej wartości historycznej właśnie wygląd *starego drewna* ma bardzo duże znaczenie jako walor estetyczny. Zatem całkowite jego zakrycie zazwyczaj nie jest w dopuszczalne. Nie mówimy tu o zmianie barwy w ograniczonym zakresie struktury zewnętrznej tylko o całkowitej zmianie, co do substancji historycznej jest niedopuszczalne i nie do przyjęcia. Bardzo często te właśnie walory są stawiane ponad bezpieczeństwo pożarowe, w sposób świadomy decydując się na ryzyko trwałego uszkodzenia bądź całkowitej utraty wartości historycznej w czasie pożaru.

3.2.3 Farby i powłoki pęczniące (intumescent coatings) – mechanizm, skuteczność i ograniczenia. Metody kombinowane

Farby i powłoki pęczniące (*intumescent coatings*) stanowią odrębną kategorię metod biernej ochrony, w której aktywacja mechanizmu ochronnego następuje dopiero w warunkach pożaru. Standardowa powłoka zawiera trzy podstawowe składniki reaktywne: kwas najczęściej polifosforan amonu (APP); środek węglotwórczy - pentaerytrytol, skrobię lub dipentaerytrytol; środek porotwórczy - melaminę lub jej pochodne. W warunkach pożarowych składniki te reagują sukcesywnie, prowadząc do wydzielenia gazów i gwałtownego pęcznienia powłoki (typowo 50 - 100 - krotnego wzrostu objętości), które tworzy mikroporowatą izolacyjną masę węglistą o niskiej przewodności cieplnej¹²¹.



Rysunek 11. Tablica porównanie uszkodzeń: element lewy niezabezpieczony, prawy zabezpieczony farbą pęczniącą¹²²

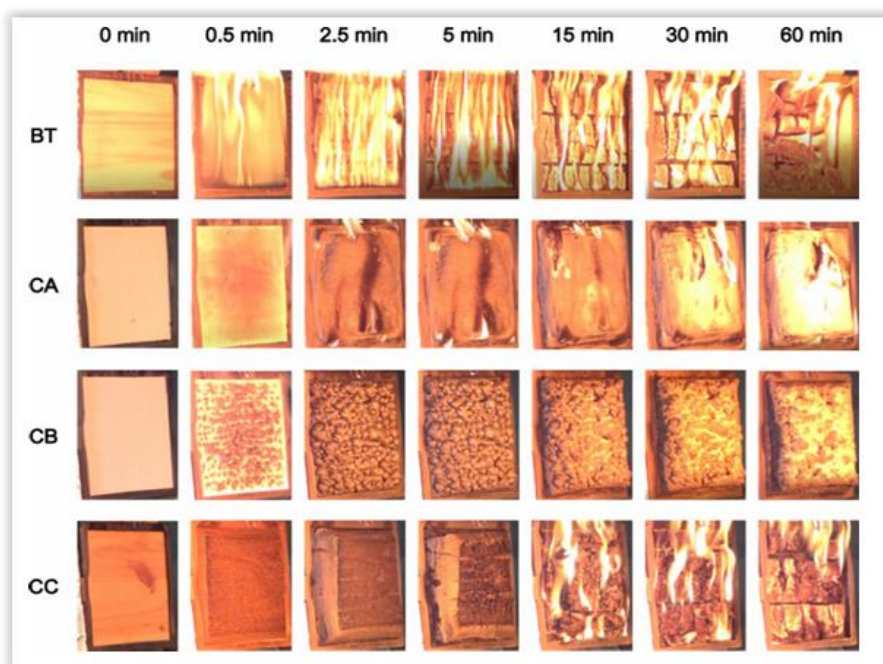
Łączna grubość warstwy suchej (DFT - *dry film thickness*) wynosi w różnych systemach od 0,18 do nawet zbliżonej do 3,0 mm, co czyni ten typ zabezpieczenia minimalnie inwazyjnym pod względem estetycznym - wymagania dla preparatów przezroczystych¹²³. Przeprowadzone badania dla kilku typów środków intymescencyjnych wykazały bardzo różne właściwości zabezpieczające. Do testów wykorzystano trzy typy środków: powłoka A na bazie rozpuszczalnika i B na bazie wody, powłoki nieprzezroczyste oraz powłoka C przezroczysta na bazie wody. Badania były prowadzone dla kilku charakterystycznych strumieni o mocy 25,50,75 kW/m². Średni

¹²¹ S. Spyridakis, [i. in.], *Effect of Thin Intumescent Coating*, 2025, s.5719-5747.

¹²² A. Lucherini, C. Maluk, Q.S. Rozzaque, *Exploring the fire behaviour of thin intumescent coatings used on timber*, *Fire Safety Journal*, t. 109, 2019,

¹²³ Tamże.

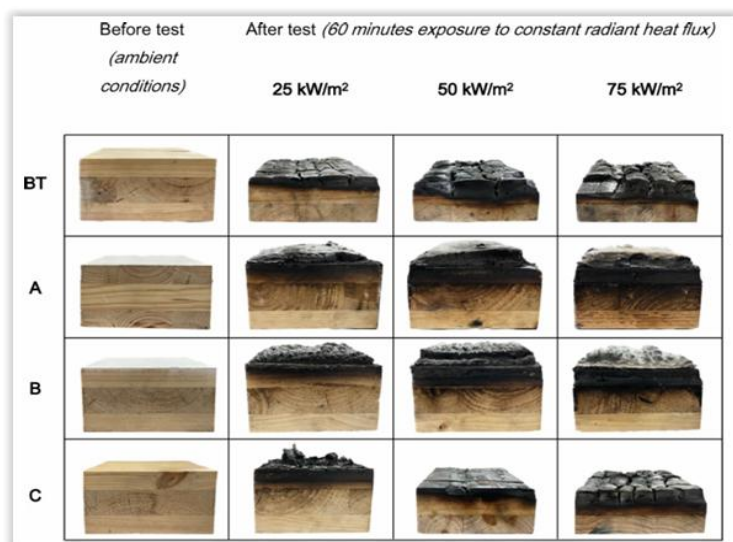
spadek szybkości zwęglania dla powłoki A i B w porównaniu z niezabezpieczonym elementem to odpowiednio 70%, 62% i 56%. Wartości odpowiadają podanym wcześniej mocom promiennika. Natomiast warstwa C przeźroczysta osiągnęła średnie obniżenie szybkości przypalenia/zwęglania do 36%, 18% i zera przy tych samych wartościach strumienia ciepła.¹²⁴



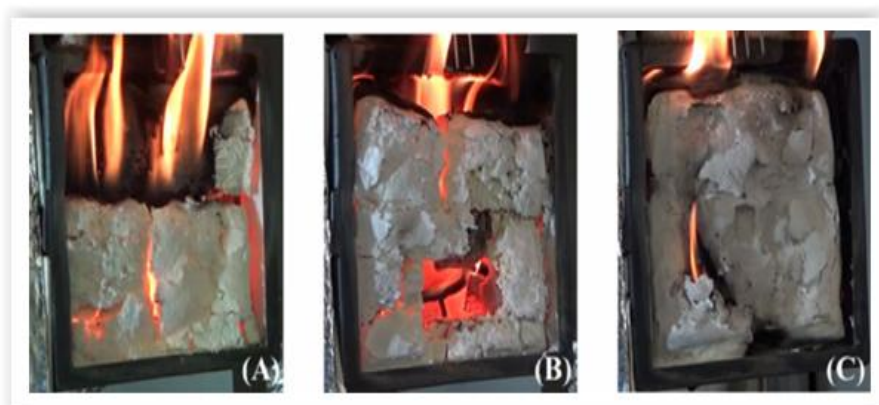
Rysunek 12. Efekt zastosowania powłoki pęczniącej na elementach drewna klejonego przy mocy promiennika testowego 50 kW/m², (BT – brak zabezpieczenia, CA – powłoka A, CB – powłoka B, CC – powłoka C)¹²⁵

¹²⁴ S. Spyridakis, *Effect of Thin Intumescent Coating Type and Thickness on the Charring of Mass Timber Under Varied Heat Flux Exposure*. Fire Technology 6, 2025. S. 5719 - 5747.

¹²⁵ S. Spyridakis. *Effect of Thin Intumescent Coating Type...*, s. 5729.



Rysunek 13. Efekt zastosowania powłoki pęczniącej na elementach drewna klejonego przy mocy promiennika testowego 25,50 i 75 kW/m² (BT – brak zabezpieczenia, CA – powłoka A, CB – powłoka B, CC – powłoka C)¹²⁶



Rysunek 14. Powłoka o niskiej grubości DFT testowana przy mocy 75 kW/m² (A – uszkodzenie przyczepności powłoki, B Odpadanie zwęglonego drewna, C pęknięta powierzchnia powłoki)¹²⁷

¹²⁶ S. Spyridakis. *Effect of Thin Intumescent Coating Type...*, s. 5731.

¹²⁷ Tamże s. 5737.

Tabela 5. Wpływ grubości powłoki pęczniejącej i rodzaju użytego środka na redukcję szybkości zwęglania przy temperaturze 300°C i zmiennej mocy promiennika testowego

Surface type	DFT (mm)	Total char depth of timber [mm] (Mean char depth at 60 min)		
		25 kW/m ²	50 kW/m ²	75 kW/m ²
Bare Timber	N/A	44.6	63.4	65.9
Coating A	Low: 1.18±0.12	13.5	31.7	41.5
	Med: 1.57±0.10	10.8	24.9	32.5
	High: 2.45±0.15	6.5	15.2	21.9
Coating B	Low: 1.08±0.10	13.3	25	34.3
	Med: 1.72±0.12	6.1	18	29.4
	High: 2.25±0.15	2.3	13	20.5
Coating C	Low: 0.19±0.01	30.8	53.1	65.8
	Med: 0.27±0.01	27.4	51.9	60.1
	High: 0.37±0.03	17.1	43	63.2

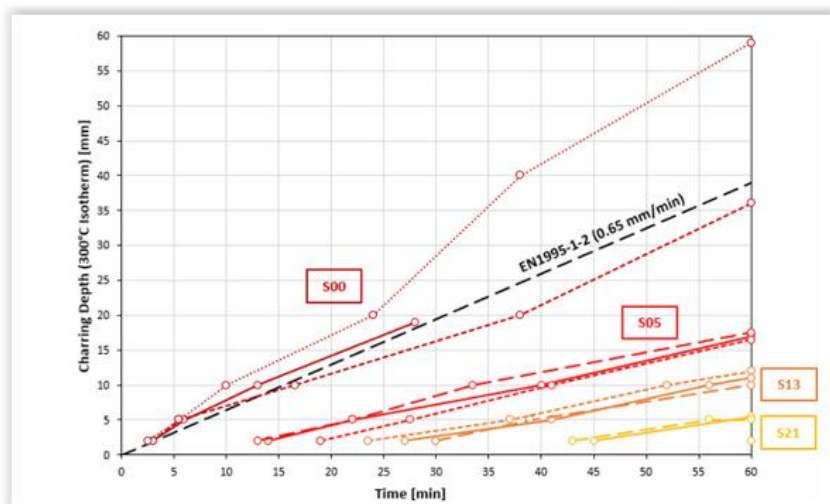
Źródło: S. Spyridakis, [i. in.], *Effect of Thin Intumescent Coating Type and Thickness on the Charring of Mass Timber Under Varied Heat Flux Exposure*. Fire Technology 2025, s. 5737

Przedstawione w tabeli nr 5 wyniki badań wskazują na zmienny wpływ powłok pęczniejących w zależności od grubości i rodzaju powłoki. Najlepsze właściwości ochronne i największy stopień zmniejszenia szybkości zwęglania zauważalny jest dla niższych wartości strumienia ciepła. Czym wyższa wartość, ta różnica zmniejsza się, a w szczególnych wypadkach wręcz można powiedzieć, że jest pomijalna.

Lucherini i Maluk (2019) przeprowadzili systematyczne badania cienkościennych powłok pęczniejących na podłożu drewna litego. Wykazali, że skuteczność izolacyjna powłoki jest silnie zależna od warunków ekspozycji termicznej: przy niskich gęstościach strumienia cieplnego następuje opóźnienie w sposób istotny inicjacji zwęglania, natomiast przy wysokich strumieniach (75 - 100 kW/m²) skuteczność drastycznie maleje wskutek szybkiej degeneracji mechanicznej spieniającej się masy węglistej¹²⁸.

¹²⁸ A. Lucherini, *Exploring the fire behaviour...*

Wykres 8. Wpływ grubości powłoki pęczniejącej na końcową głębokość zwęglonej warstwy (SOO – brak zabezpieczenia, S05 – 0,5mm; S13- 1,3 mm; S21 – 2,1 mm)



Źródło: A. Lucherini, C. Maluk, *Exploring the fire behaviour of thin intumescent coatings used on timber*, Fire Safety Journal, t. 109, 2019, s.7

Zastosowanie farb i mas pęczniejących w obiektach zabytkowych jest obarczone szczególnymi ograniczeniami. Powłoki te po jednorazowej aplikacji są niezwykle trudne lub niemożliwe do usunięcia bez uszkodzenia powierzchni historycznego drewna, co stanowi zasadniczą przeszkodę w kontekście wymogu odwracalności ingerencji konserwatorskiej. Ich składniki chemiczne mogą wchodzić w reakcje z substancją zabytkową i zmieniać właściwości sorpcyjne i barwę drewna. Ograniczenia dla powłok pęczniejących są zbieżne z ograniczeniami dla impregnatów wgłębnych, jednak z tym większym obostrzeniem, że niektóre z obecnie stosowanych w obrocie handlowym już w założeniu są nieprzeźroczyste, co całkowicie dyskwalifikuje je w obiektach, gdzie element ma zostać niezmieniony wizualnie.

Bardzo ciekawe podejście do zabezpieczenia elementów drewnianych przedstawili w swoich badaniach A. Yakhajew i inni (2023)¹²⁹, łącząc ze sobą impregnację elementów drewnianych roztworem o składzie Ammophos-A, siarczaniu amonu, perlitu ekspandowanego oraz epoksydu w stosunku masowym 15:15:10:50, a następnie obudowa elementu płytami kartonowo - gipsowymi. Wyniki wskazują na pozytywne

¹²⁹ A. Yakhayev, [i.in.], *Improving the fire resistance of wooden structures by a combined method*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, s. 57-64.

cechy takiego kombinowanego rozwiązania, co jest podstawą do dalszych szczegółowych badań takiego nowatorskiego podejścia.

3.3. Analiza porównawcza metod – skuteczność, ograniczenia i zestawienie

3.3.1. Kryteria porównania i hierarchia skuteczności

Analiza czterech głównych metod biernej ochrony ujawnia wyraźną hierarchię skuteczności w kryterium nośności ogniowej (R). Masy natryskowe i wielowarstwowe okładziny zapewniają najdłuższe czasy ochrony. Powłoki pęczniące zapewniają zazwyczaj opóźnienie inicjacji zwęglania, jednak ich walory ochronne na podstawie badań są znacznie lepsze od impregnacji, natomiast w pewnym zakresie mocy pożaru impregnacja ogniochronna poprawia przede wszystkim klasę reakcji na ogień, a jej wpływ na prędkość zwęglania jest ograniczony.

Każda z omawianych metod, zarówno okładziny płytowe, impregnacja oraz powłoki pęczniące ma charakter stałego, jednokierunkowego rozwiązania: aplikacja jest czynnością zasadniczo nieodwracalną, a każda ingerencja wymaga odbudowy lokalnej lub całościowej systemu ochrony.

Obiekty zabytkowe stanowią wyjątkowe wyzwanie dla wszelkich form biernej ochrony przeciwpożarowej. Historyczne drewno stosowane w zabytkowych więźbach pochodzi niejednokrotnie z gatunków dziś rzadkich (jodła karpacka, modrzew europejski, sosna pospolita w odmianie starodrzewu) i elementów o sezonowaniu trwającym stulecia.

Z perspektywy wymagań konserwatorskich idealne rozwiązanie ochrony pożarowej elementów drewnianych powinno cechować się: (1) odwracalnością – możliwością usunięcia bez trwałego naruszenia substancji zabytkowej, (2) minimalnym dodatkowym obciążeniem chronionej konstrukcji, (3) dostępnością inspekcji stanu chronionego elementu, (4) adaptatywnością – możliwością zastosowania na elementach o złożonej geometrii bez kosztownego dopasowywania. Żadna z aktualnie dostępnych metod nie spełnia łącznie wszystkich tych wymagań.

Żadna z omawianych metod nie odpowiada wymogom taniego, łatwego w aplikacji i odwracalnego rozwiązania ze względu na wysokie koszty materiałowe i niemożliwość odwrócenia procesu. Idealne zabezpieczenie tymczasowe powinno być tanie, łatwe w montażu i odwracalne szczególnie w okresach przejściowych, gdy brakuje pełnego zabezpieczenia do momentu wdrożenia docelowego rozwiązania ochrony.

3.4. Identyfikacja luki badawczej – przegląd krytyczny piśmiennictwa

3.4.1. Stan badań nad tkaninami technicznymi w ochronie pożarowej konstrukcji

Przegląd piśmiennictwa naukowego wskazuje na całkowity brak badań systematycznie oceniających skuteczność tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako zewnętrznych osłon termicznych elementów z drewna litego iglastego. Prace z kluczowych baz danych – *Fire Safety Journal*, *Fire Technology*, *Fire and Materials*, *Construction and Building Materials* oraz *Journal of Cultural Heritage* – obejmują zastosowania pokrewne, jednak żadna nie odpowiada bezpośrednio na pytanie badawcze niniejszej rozprawy.

Tsapko i in. (2021) zbadali transfer ciepła przez tkaninę szklaną pokrytą powłoką pęczniącą do podłoża drewnianego. Wyniki wykazały skuteczność termiczną układu tkanina–powłoka, jednak w badanym mechanizmie tkanina pełni rolę nośnika powłoki, a nie samodzielnego elementu bariery termicznej¹³⁰.

Konfiguracja badana przez Tsapko i in. jest zasadniczo odmienna od koncepcji opisanej w rozprawie: osłona tkaninowa stanowiąca przedmiot badań własnych jest elementem mechanicznie niezwiązanym z powierzchnią drewna, pomijając sposób montażu, który nie był przedmiotem analizy, działającym jako ekran termiczny ze szczeliną powietrzną. Mechanizm ochrony jest zatem inny i wyniki badań Tsapko nie mogą być bezpośrednio transponowane na analizowaną konfigurację.

Takahashi (2019) opisał koncepcję tkaninowych osłon całych budynków w strefach WUI (*Wildland–Urban Interface*). Badane konfiguracje polegały na owijaniu budynku tkaniną szklaną lub ceramiczną w celu ochrony przed radiacyjnym i konwekcyjnym przenikaniem ciepła z pożaru zewnętrznego. Badane tkaniny redukowały strumień w różnym zakresie. Jednak konkluzja po testach w rzeczywistych warunkach wskazały przydatności tego rozwiązania przy niedługich ekspozycjach (<10 min) na działanie podwyższonych temperatur na zastosowane osłony m.in. z włókna szklanego. Wskazano też, że przy czasach ekspozycji od 10 – 60 min celowym byłoby użycie tkanin o większej grubości lub zespoły kilkuwarstwowych materiałów¹³¹,

¹³⁰ Y. Tsapko, [i. in.], *Establishing Regularities of Temperature Conductivity Reduction When Protecting Fabric Against Fire by Intumescent Coating*, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, t. 2, nr 10, 2022, s. 74–80,

¹³¹ F. Takahashi, *Whole-House Fire Blanket...* s. 60.



Rysunek 15. Stanowisko badawcze i próbka po badaniach opisana w materiałach Y. Tsapko¹³²

Cel ochrony i geometria układu różnią się jednak od koncepcji rozprawy. Takahashi bada ochronę budynku przed pożarem zewnętrznym, podczas gdy badania własne dotyczą ochrony drewnianych elementów wewnątrz obiektu przed zwęglaniem i utratą nośności w warunkach znormalizowanego pożaru. Ponadto prace Takahashiego nie zawierają danych na temat prędkości zwęglania zabezpieczonych elementów drewnianych, lecz jedynie opierają się na obserwacji zmian wyglądu zabezpieczonych elementów.

Żadna z omówionych grup publikacji nie dotyczy bezpośrednio konfiguracji badanej w rozprawie: zewnętrznej osłony tkaninowej niezwiązanej mechanicznie z drewnem litym iglastym, działającej jako samodzielna bariera termiczna ze szczeliną powietrzną w warunkach pożaru. Potwierdza to istnienie realnej luki badawczej uzasadniającej podjęcie tematu.

Luka ta ma dodatkowe wymiary: brak danych o zastosowaniu tkanin technicznych w obiektach zabytkowych; brak badań w zakresie tymczasowych zabezpieczeń biernych na czas prac remontowych i pożarowo-niebezpiecznych.

¹³² Y. Tsapko, A. *Establishing Regularities of Temperature...* s. 78.



Rysunek 16. Jedna z prób w rzeczywistych warunkach przytoczona w opracowaniu F.

Takahashi¹³³

Przeprowadzony przegląd głównych metod biernej ochrony przeciwpożarowej elementów drewnianych wykazał, że żadna z tych metod nie spełnia łącznie czterech kluczowych kryteriów: skuteczności w kryterium R, odwracalności, stosowalności na złożonych geometriach i braku inwazyjności wobec substancji zabytkowej.

Identyfikowana luka badawcza stanowi bezpośrednie uzasadnienie dla podjęcia tematu rozprawy. Badania własne mają na celu ocenę skuteczności tkanin technicznych z włókna szklanego jako zewnętrznych, odwracalnych barier termicznych dla drewnianych elementów nośnych z drewna litego iglastego, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w obiektach zabytkowych jako rozwiązania docelowego oraz tymczasowego.

¹³³ F. Takahashi, *Whole-House Fire Blanket ...*, s. 18.

ROZDZIAŁ 4. TKANINY TECHNICZNE – WŁAŚCIWOŚCI, KLASYFIKACJA I ZASTOSOWANIA W OCHRONIE PRZECIWPÓŻAROWEJ, ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM TKANIN NA BAZIE WŁÓKNA SZKLANEGO

Tkaniny techniczne stanowią odrębną kategorię wyrobów włókienniczych, których właściwości użytkowe, a nie walory estetyczne wyznaczają obszar zastosowania. W kontekście rozprawy kluczowe są te, których skład surowcowy i struktura zapewniają trwałą barierę termiczną w warunkach oddziaływania pożaru. Rozdział ten systematyzuje terminologię, omawia właściwości tkanin na bazie włókna szklanego - niemodyfikowanych oraz z powłokami funkcjonalnymi - prezentuje model analityczny przepływu ciepła przez układ tkanina – szczelina - drewno oraz charakteryzuje dotychczasowe zastosowania tkanin technicznych w ochronie przeciwpożarowej jako kontekst dla hipotezy badawczej¹³⁴.

4.1. Tkaniny techniczne – systematyka i terminologia

4.1.1. Klasyfikacja ze względu na surowiec i przeznaczenie

Pod względem surowcowym tkaniny techniczne dzieli się na wyroby z włókien mineralnych (szklanych, krzemionkowych, bazaltowych, ceramicznych), włókien organicznych odpornych na wysoką temperaturę (aramidowych – *Nomex*, *Kevlar*, PBI) oraz materiałów hybrydowych. W kontekście ochrony przeciwpożarowej elementów drewnianych decydujące znaczenie mają tkaniny mineralne ze względu na dostępność, relatywnie niski koszt jednostkowy, ich nieorganiczny skład zapewnia integralność strukturalną w całym zakresie temperatur w zależności od modyfikacji (400 - 1100°C). Tkaniny aramidowe, szeroko stosowane w odzieży ochronnej strażaków (projektowane temperatury ciągłej pracy 160 - 210°C, krótkotrwałe do 540°C), ulegają karbonizacji powyżej 430°C, co dyskwalifikuje je jako długotrwałą barierę¹³⁵.

¹³⁴ W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017, s. 50–55.

¹³⁵ M. Fejdyś, M. Łandwijt, *Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe*, Techniczne Wyroby Włókiennicze, R. 18, nr 1/2, 2010, MORATEX, s. 5–10.

4.2. Tkaniny szklane – właściwości surowcowe, termiczne i mechaniczne

4.2.1. Skład chemiczny i technologia wytwarzania

Istnieją dwa podstawowe typy włókien szklanych: E i S. Pierwszy z nich ma gorsze właściwości mechaniczne (sprężyste, wytrzymałościowe, zmęczeniowe, uderzeniowe), ale znacznie niższą cenę niż typ S, który produkowany jest przede wszystkim dla przemysłu obronnego. Wśród włókien szklanych można wyróżnić włókna o wysokiej odporności na korozję ECR o niskiej stałej dielektrycznej D oraz włókna o bardzo wysokiej wytrzymałości czystej krzemionki lub kwarcu, które mogą być stosowane w wysokiej temperaturze. Ponadto stosowane są włókna klasy A i C włókna kanalikowe i dwuskładnikowe¹³⁶.

Tabela 6. Porównanie właściwości wybranych typów włókien szklanych

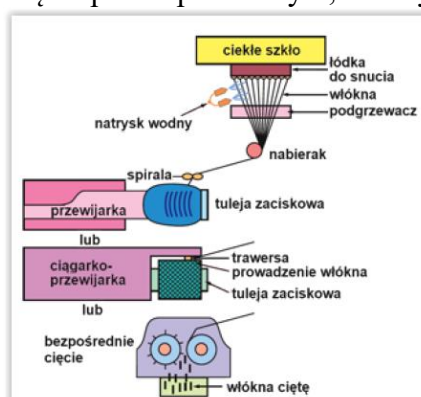
	Rodzaje włókien szklanych		
	A	E	S
Gęstość, kg/m ³	2550	2460	2490
Twardość w skali Mohsa	6,5°	6,0°	-
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa w temperaturze			
25°C	3150	3500	4500
260°C	-	3000	4200
540°C	-	1750	2470
Moduł sprężystości w temp. 25°C, GPa	66,5	73,5	86,5
Liczba Poissona	0,23	0,22	-
Współczynnik rozszerzalności cieplnej liniowej, 1/°C	$7,74 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^{-6}$	-
Przewodność cieplna, W/(m·°C)	0,94	1,04	-
Stała dielektryczna przy częstotliwości:			
10 ² Hz	-	6,43	-
10 ¹⁰ Hz	-	6,11	-
$5 \cdot 10^{15}$ Hz	6,8	-	5,6
Współczynnik strat dielektrycznych [tgδ] przy częstotliwości:			
10 ¹⁰ Hz	-	0,006	-
$5 \cdot 10^{15}$ Hz	0,007	-	-
Współczynnik załamania światła dla $\lambda=550\mu\text{m}$	1,52	1,548	1,513
Chłonność wody, %	0,15-0,25	-	-

Źródło: M. Fejdyś, M. Łandwajt, *Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe Techniczne Wyroby włókiennicze*, 2010

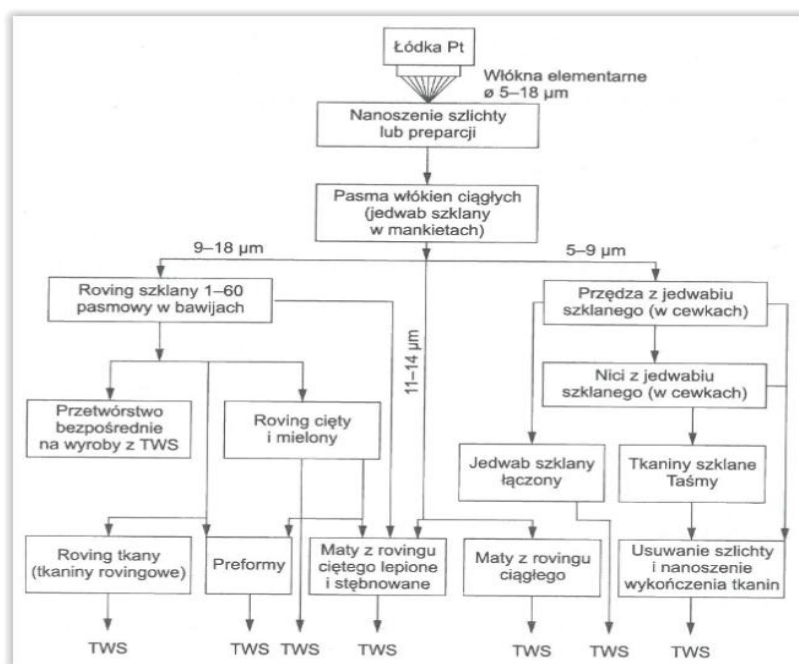
Włókno szklane E-glass produkuje się przez topienie wsadu w piecach wannowych w temperaturze ok. 1200 - 1400°C, masa wypływa przez otwory *bushingy* (płytki platynowo-rodowe o otworach $\varnothing$ 1-2 mm). Wypływające przez dysze krople w postaci wiązki grubych włókien zakładane są na obracający się bęben (300 obr/min), wskutek czego są one uciągane do średnicy ok 7-15 μm . Następnie Strumień szkła pod dyszą w

¹³⁶ M. Fejdyś, *Włókna techniczne wzmacniające....*

obrębnie kilkunastu milimetrów staje się cieńszy ok. 40 tys. razy i pozostaje schłodzony do temperatury otoczenia w bardzo krótkim czasie¹³⁷. Bezpośrednio po wyjściu z bushingu filamenty przechodzą przez aplikator *sizingu* (na bazie silanów lub emulsji polimerowych), który chroni je przed wzajemnym ścieraniem i zapewnia kompatybilność z późniejszymi powłokami funkcjonalnymi. Bez procesu preparacji byłoby praktycznie niemożliwe nanoszenie powłok funkcjonalnych i prowadzenie dalszego procesu tkania na krosnach. Z kilku standardów skręcanych razem powstaje przędza, z której na krosnach wytwarza się tkaninę o splocie płóciennym, skośnym lub satynowym¹³⁸.



Rysunek 17. Schemat procesu formowania włókien szklanych¹³⁹



Rysunek 18. wyroby z tekstylnych włókien szklanych¹⁴⁰

¹³⁷ W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne...*, s. 55–60.

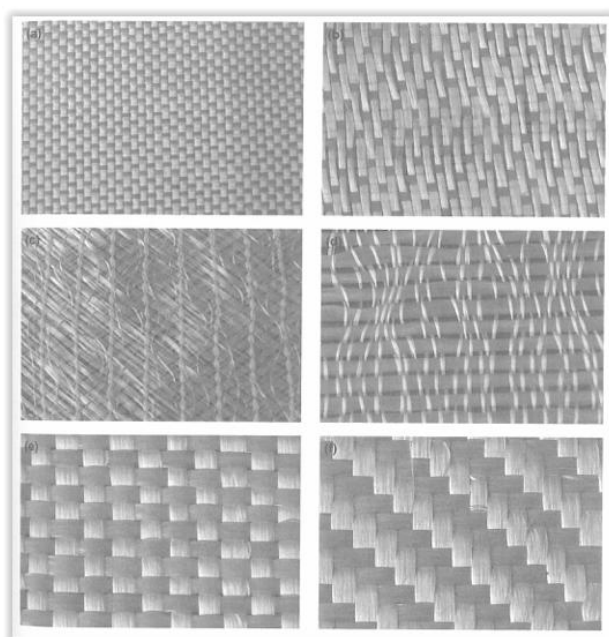
¹³⁸ Tamże.

¹³⁹ M. Fejdyś, *Włókna techniczne wzmacniające...*

¹⁴⁰ M. Fejdyś, *Włókna techniczne wzmacniające...*, str. 63 rys. 3.7.

Następnym etapem w sposób znaczący wpływającym m.in. na parametry ochronne w zakresie wysokich temperatur jest proces tkania wcześniej spreparowanych włókien.

Rozróżnia się tkaniny zrównoważone, w których osnowa i wątek są masowo takie same oraz tkaniny niezrównoważone, ukierunkowane UD, w których ilość osnowy i wątku są różne, a nawet w których nie ma wątku i pasma osnowy są wiązane cienkimi nićmi obcymi. Wytwarzane są też tkaniny bez przelotów, tzw. wysokomodułowe HM związane cieką nitką obcą. Oferowane są też również tkaniny wieloosiowe, najczęściej trójosiowe o osiach 90^0 , 45^0 , 0^0 . Stosowane są też różne sploty tkanin, ich podstawowe rodzaje to: splot płócienny, splot satynowy, splot rządkowy oraz sploty specjalne¹⁴¹.



Rysunek 19. Sploty tkanin szklanych a) płócienny, b) satynowy 4-krotny, tkanina o wysokim module, d) tkanina UD, e) tkanina o splocie płóciennym, f) tkanina rovingowa o splocie rządkowym¹⁴²

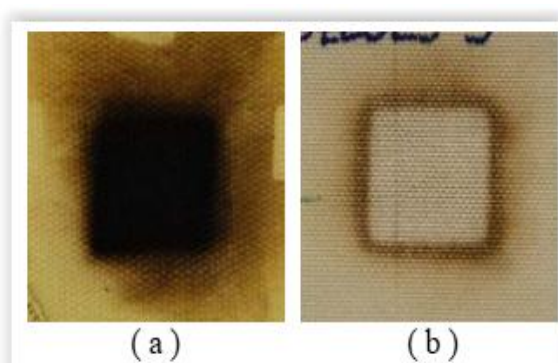
Włókno szklane nie pali się, jego odporność cieplna jest w granicach temperatury 20 - 200°C, wytrzymałość nieznacznie wzrasta do temperatury około 300°C oraz nieco maleje powyżej tej temperatury wyraźnie się zmniejsza, jednak dopiero ogrzanie w ciągu 24 godzin w temperaturze 400°C powoduje zmniejszenie wytrzymałości pierwotnej o 50%. Powyżej 600°C następuje gwałtowny spadek wytrzymałości włókien szklanych, w

¹⁴¹ W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne...*, s. 50–55

¹⁴² Tamże, s. 67.

temperaturze poniżej 0°C włókno zachowuje swoje właściwości użytkowe, nawet w temperaturze minus 50 ° nie ma widocznych zmian właściwości mechanicznych¹⁴³.

Tkaniny szklane niemodyfikowane zachowują ciągłość mechaniczną do ok. 550 - 600°C przy ekspozycji ciągłej oraz do 650 - 700°C przy ekspozycji krótkotrwałej. Kryterium trwałości jest zachowanie integralności tkaniny, braku przepaleń lub prześwitów umożliwiających bezpośredni przepływ ciepła. Takahashi i in. (2014) na podstawie badań wielu tkanin w warunkach symulowanego pożaru WUI potwierdzają, że tkaniny szklane z powłoką min. wermikulitową zapewniają znaczącą redukcję szczytowego strumienia ciepła w porównaniu z tkaninami niemodyfikowanymi¹⁴⁴.



Rysunek 20. Tkaniny wystawione na działanie strumienia o mocy 84 kW/m² przez czas 1 min (a) aramid/fiberglass; (b) 100% fiberglass¹⁴⁵

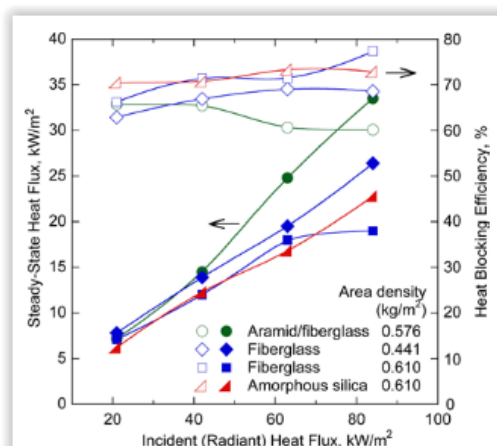
Badania dostępne w literaturze światowej oraz badania własne, przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej zarówno laboratoryjne, jak i poligonowe, wykazują znaczący wpływ blokady przepływu ciepła jako kluczowego mechanizmu w systemach ochrony przeciwpożarowej.

¹⁴³ M. Fejdyś, M. Łandwajt, *Włókna techniczne...*, s. 10–14.

¹⁴⁴ F. Takahashi [i in.], *Characteristics of Fire Blanket...*, s. 1-14.

¹⁴⁵ F. Takahashi [i in.], *Characteristics of Fire Blanket...*, s.7.

Wykres 9. Elekt blokowania strumienia ciepła w rozróżnieniu na różne materiały



Źródło: F. Takahashi [i in.], VI International Conference on Forest Fire Research
D.X. Viegas (Ed). 2010 Fig 8 str. 12

4.3. Tkaniny szklane z powłokami funkcjonalnymi

Powłoka aluminiowa – właściwości refleksyjne i radiacyjne

Laminowanie folią aluminiową lub natrysk Al podwyższa współczynnik odbicia promieniowania podczerwonego. Mechanizm ochrony tkaniny aluminizowanej opiera się na redukcji składowej radiacyjnej strumienia ciepłego opisanej prawem Stefana-Boltzmann. Zmniejszenie ε z $\approx 0,9$ (tkanina szklana surowa) do $\approx 0,05$ (Al polerowane) redukuje strumień radiacyjny. Powłoka aluminiowa ulega utlenieniu powyżej ok. 300°C (warstwa folii polimerowej nośnej) lub ok. 600°C (czyste Al), co ogranicza skuteczność refleksyjną przy długotrwałej ekspozycji.

Powłoka wermikulitowa – eksfoliacja i izolacja

Wermikulit jest minerałem glinokrzemianowym o strukturze blaszkowej, wykazującym zdolność do termicznej eksfoliacji (pęcznienia) w zakresie 250 - 1000°C. Powłoka wermikulitowa podnosi temperaturę ciągłej pracy tkaniny E-glass do ok. 800 - 815°C (krótkotrwale 1090°C). Mechanizm ochrony obejmuje: (a) tworzenie warstwy porowatej o niskiej przewodności cieplnej; (b) pochłanianie ciepła w endotermicznym procesie eksfoliacji. Tsapko i in. (2022) wykazali, że powłoka pęczniejąca na tkaninie

szklanej redukuje efektywną przewodność cieplną układu w stosunku do tkaniny bazowej, a efekt izolacyjny nasila się ze wzrostem temperatury¹⁴⁶.

Pozostałe powłoki – silikon

Powłoka silikonowa ($T_{ciągła} \approx 260 - 300^{\circ}\text{C}$), zapewnia szczelność gazową tkaniny, co ogranicza migrację gazów pirolizy drewna (CO , CH_4 , substancje smołowe) przez barierę (rozkład $> 260^{\circ}\text{C}$, nasilony $> 350^{\circ}\text{C}$), nadaje hydrofobowość i odporność chemiczną; jej zastosowanie jako bariery ogniowej jest ograniczone przez temperaturę degradacji. Większość powłok modyfikujących bazowe właściwości włókna szklanego mają charakter użytkowy, w ograniczonym zakresie wpływają na parametry pożarowe, a i często je mocno pogarszając na poczet innych walorów technicznych.

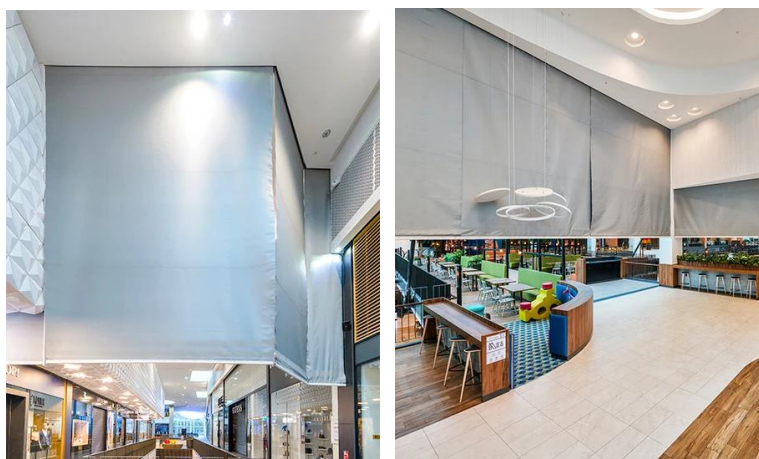
4.4. Dotychczasowe zastosowania tkanin technicznych w ochronie ppoż.

4.4.1. Kurtyny przeciwpożarowe i koce gaśnicze

Kurtyny przeciwpożarowe na bazie włókna szklanego zbrojone lub z powłokami funkcjonalnymi są certyfikowanymi wyrobami budowlanymi klasyfikowanymi wg PN-EN 13501-2. Natomiast szczegółowe wymagania dotyczące kurtyn dymowych znajdziemy w normie PN-EN 12101-1:2007. Stanowią jeden z nielicznych przykładów tkaniny technicznej jako stałego zabezpieczenia budowlanego dopuszczonego w systemie europejskim. Koce gaśnicze z E-glass lub ceramiki głównie służą do odcięcia dostępu tlenu i ograniczenia pożaru w zarodku. Różnica w stosunku do koncepcji osłony drewna dotyczy konfiguracji: kurtyna jest usytuowana tylko pionowo, opadanie-uruchomienie następuje zazwyczaj podczas wykrycia zagrożenia lub ręcznego wyzwolenia, natomiast osłona z tkaniny przylega bezpośrednio do elementu drewnianego, zapewniając ciągłą ochronę bez konieczności stosowania dodatkowych elementów uruchamiających. Analizując wymagania normy przytoczonej powyżej, można odczytać podział ze względu na czas działania i maksymalne temperatury pracy, czyli $< 600^{\circ}\text{C}$ i zakres $827 - 1100^{\circ}\text{C}$. Zatem praca tkanin technicznych w różnym układzie warstwowym i konstrukcyjnym została już przebadana i sprawdzona w „boju”. Badania tkanin w kierunku zabezpieczenia np. konstrukcji są więc kontynuacją. Kurtyny przeciwpożarowe w założeniu izolują przestrzeń, a wykorzystane tkaniny techniczne bezpośrednio

¹⁴⁶ Y. Tsapko [i in.], *Establishing Regularities of Temperature Conductivity Reduction When Protecting Fabric Against Fire by Intumescent Coating*, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10), 2022, s. 74–76.

ograniczają oddziaływanie promieniowania na zabezpieczany element. Jak przedstawiają wieloletnie doświadczenia w zakresie stosowania kurtyn, w pozytywny sposób wpływają na poprawę bezpieczeństwa. Ograniczają w znaczący sposób rozprzestrzenianie się dymu i gorących gazów pożarowych, szczególnie w początkowej fazie pożaru, znacznie poprawiając warunki ewakuacji użytkowników. Ponadto stanowią często nieodzowny element systemów oddymiania, wpływając bezpośrednio na ich skuteczność.



Rysunek 21. Przykład zastosowania elastycznych kurtyn dymowych z tekstyliów technicznych w rzeczywistych warunkach obiektowych¹⁴⁷

Koce i płachty gaśnicze stanowią jedno z najstarszych i najprostszych narzędzi do tymczasowego zabezpieczenia przed zagrożeniem pożarowym oraz gaszenia pożaru w jego bardzo wczesnej fazie. Technologia ta, znana od wielu lat, przeszła znaczną ewolucję od początkowo stosowanych materiałów włóknistych na bazie azbestu, zakazanych ze względu na toksyczność, do nowoczesnych rozwiązań opartych na włóknach szklanych (E-glass), czasami z dodatkowymi warstwami funkcjonalnymi. Ta zmiana materiałowa nie oznaczała utraty efektywności, lecz znaczącą poprawę warunków bezpieczeństwa użytkowników oraz ochrony środowiska. Szczegółowe wymagania dla kocy gaśniczych opisuje norma PN-EN 1869:2019-12¹⁴⁸.

Efektywność kocy gaśniczych opiera się na dwóch podstawowych mechanizmach działania: izolacji termicznej oraz odcięciu dostępu tlenu do obszaru spalania. Włókniste struktury o charakterystyce opisanej w poprzednich sekcjach wykazują zdolność do szybkiego pochłaniania energii promieniowania i konwekcyjnej, jednocześnie tworząc

¹⁴⁷ www.mercor.com.pl/produkt/mcr-prosmoke-fsce-automatyczne-kurtyny-dymowe PROSMOKE FS/CE AUTOMATYCZNE KURTyny DYMOWE - Systemy przeciwpożarowe i systemy oddymiania | MERCOR [5.04.2026]

¹⁴⁸ PN-EN 1869:2019-12 Koce gaśnicze Norma określająca wymagania dotyczące budowy, właściwości gaśniczych, znakowania i metod badań.

barierę fizyczną między źródłem ognia a otoczeniem. W praktyce stosowanie pokrycia materiału palnego lub obiektu na etapie zagrożenia wymaga dużych nakładów czasu, dlatego też koce gaśnicze najbardziej efektywne są w kontekście szybkiego reagowania i wstępnego zabezpieczenia w warunkach przemysłowych czy domowych.

Do istotnych zalet kocy gaśniczych należy zaliczyć: (1) prostotę użycia wymagającą minimalnego szkolenia, (2) niezależność od zasilania energią czy dostępności do źródła wody czy innego środka gaśniczego, (3) możliwość wielokrotnego stosowania tego samego materiału bez konieczności uzupełniania zawartości (przy braku uszkodzeń związanych z uszkodzeniami mechanicznymi czy zmianami struktury przy długotrwałym oddziaływaniu temperatur powyżej 600 - 800°C, (4) bezpieczeństwo dla użytkownika wynikające z braku ekspozycji na szkodliwe aerozole lub chemikalia, (5) szybkość wdrożenia w sytuacjach zagrożenia, szczególnie w fazie początkowej rozprzestrzeniania się ognia. Koce gaśnicze oferują mobilność oraz możliwość przeprowadzenia szkolenia personelu bez specjalnych wymagań technicznych.

Pozytywnym aspektem jest również możliwość szybkiego wdrożenia procedur awaryjnych bez konieczności ewakuacji całej strefy, koce mogą być zastosowane w ograniczonej przestrzeni, redukcji strat eksploatacyjnych i ochrony sąsiadujących obiektów czy przedmiotów.

Pomimo wielu zalet, koce gaśnicze stanowią element wsparcia, nie zastępują kompleksowych systemów ochrony pasywnej. Ich efektywność ogranicza się do fazy wczesnej pożaru i wymaga szybkiej reakcji personelu.

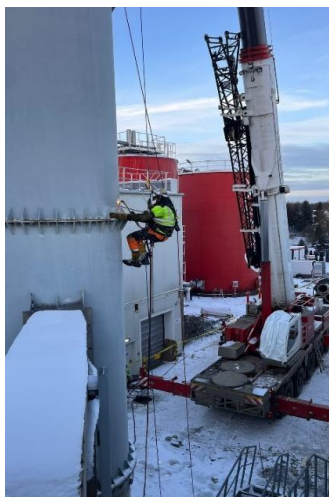
Koce gaśnicze, będące efektem wieloletniego doświadczenia praktycznego oraz ewolucji materiałów, pozostają ważnym elementem strategii ograniczenia zagrożenia pożarowego zwłaszcza we wczesnych fazach rozprzestrzeniania się ognia. Ich pozytywne aspekty: prostota, wielokrotność użycia, bezpieczeństwo dla użytkownika i mobilność stanowią istotny wkład do systemu wielopasmowej ochrony.

4.4.2. Zabezpieczenia tymczasowe przy pracach pożarowo niebezpiecznych

Tkaniny techniczne, w szczególności te oparte na włóknach szklanych (E-glass), znajdują zastosowanie nie tylko w biernej ochronie przed działaniem ognia, ale również w czasie prac pożarowo niebezpiecznych, mających na celu zabezpieczenie materiałów palnych w trakcie wykonywania prac o podwyższonym zagrożeniu pożarowym. W tej kategorii znajdują się przede wszystkim koce gaśnicze oraz specjalne osłony spawalnicze

z materiału identycznego jak wspomniane tkaniny techniczne. Prace spawalnicze, cięcia, lutowania i zgrzewania metali stanowią jedne z najczęstszych źródeł pożarów na stanowiskach pracy zarówno w warunkach przemysłowych, jak i w obiektach użyteczności publicznej, gdzie takie operacje wykonuje się w warunkach nieprzewidzianych dla tego typu działalności.

Prace spawalnicze są jednoznacznie zaliczane do prac niebezpiecznych pod względem pożarowym i wybuchowym, co wynika z Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 27 kwietnia 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach spawalniczych¹⁴⁹. Rozporządzenie to wymaga, aby miejsce wykonywania prac spawalniczych było zabezpieczone przed wywołaniem pożaru przez rozpryski iskier, żużla lub gorących cząstek stałych, co jest wykonywane najczęściej właśnie przez zastosowanie kocy i płacht z włókna szklanego. Jest to rozwiązanie proste, nieinwazyjne i wielokrotnego użycia, co przy zmiennej lokalizacji wykonywania takich prac na obiektach ma fundamentalne znaczenie. Koce gaśnicze są nie tylko wykorzystywane do zabezpieczenia wprost pożarowego, co przedstawia zdjęcie autora w czasie wykonywania prac na wysokościach, gdzie standardowe koce gaśnicze posłużyły do zabezpieczenia szyb dźwigu, co wskazuje na bardzo dużą wszechstronność włókna szklanego jako elementu ochronnego na różnych płaszczyznach.



Rysunek 22. Zabezpieczenie kabiny kocem gaśniczym przed odpryskami z cięcia.

Autor T. Puchała AlpinCroll

¹⁴⁹ Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 kwietnia 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach spawalniczych Dz.U. 2000 nr 40, poz. 470.

Podobnie jak spawanie, cięcia metali zarówno cięcia łukiem elektrycznym, jak i tlenowo acetylenowego lub powietrze propan-butan, stanowią zagrożenie pożarowe wymagające odpowiedniego zabezpieczenia sprzętem gaśniczym. Przepisy dotyczące bezpieczeństwa przy spawaniu i cięciu metali wymagają utrzymania w pobliżu stanowiska pracy naczynia napełnionego wodą lub innych odpowiednich środków gaśniczych. W praktyce nowoczesnych standardów bezpieczeństwa pracy rekomenduje się użycie kocy gaśniczych jako dodatkowego zabezpieczenia, szczególnie gdy materiały palne znajdują się w bezpośredniej bliskości cięcia (drewno, papier, izolacja palna, materiały tekstylne czy elementy konstrukcji budynków). Koce gaśnicze są szczególnie wartościowe w tym kontekście ze względu na możliwość szybkiego wdrożenia.

W kontekście rozprawy dotyczącej pasywnej ochrony drewnianych elementów konstrukcyjnych, znaczenie kocy gaśniczych nabiera znaczenia. Wynika to z ich roli w zabezpieczeniu prac mogących powodować niszczące skutki dla konstrukcji, szczególnie, gdy prace spawalnicze lub cięcia muszą być wykonywane w pobliżu drewnianych komponentów istniejących konstrukcji lub podczas renowacji obiektów zabytkowych. Koce gaśnicze stanowią element kompleksowej strategii ochrony: (1) zapewniają czasową ochronę podczas prac, (2) są wymagane przepisami prawa pracy i bezpieczeństwa pożarowego, (3) mogą uzupełniać trwałą ochronę pasywną (tkaniny techniczne, impregnacje, okładziny gipsowe), tworząc system ochrony o najwyższej niezawodności. Mimo że koce gaśnicze nie stanowią głównego obiektu badań eksperymentalnych rozprawy, ich pozycja w systemie bezpieczeństwa pożarowego drewnianych konstrukcji jest niezwykle istotna i wynika z wymogów prawnych oraz standardów bezpieczeństwa pracy.

4.4.1. Przegląd produktów dostępnych na rynku polskim

Na polskim rynku tkaniny techniczne na bazie E-glass oferują zarówno producenci krajowi, jak i dystrybutorzy firm zagranicznych. Badania własne obejmują próbki referencyjne firm Pabiantex i VITCAS; dane dostawców mają charakter niepublikowanych specyfikacji technicznych i stanowią punkt wyjścia do laboratoryjnej weryfikacji właściwości.

Tabela 7. Wybrane tkaniny na bazie włókna szklanego dostępne na rynku polskim

Lp.	Rodzaj tkaniny	T pracy ciągłej	T chwilowa	Powłoka
1	E-glass surowy (typ ECST)	450°C	600°C	brak
2	Tkanina silica ($\text{SiO}_2 > 95\%$)	1000°C	1600°C	high-silica
3	E-glass z neoprenem	120–180°C	–	neopren
4	Tkanina krzemowo-wapienna	700°C	750°C	modyfikacja krzemianowa
5	E-glass z poliuretanem	250–300°C	550°C	PU
6	E-glass z akrylem	200–250°C	550°C	akryl
7	E-glass z wermikulitem	800–815°C	1090°C	wermikulit
8	E-glass z grafitem ekspansywnym	600°C	750°C	grafit
9	Włókna krzemowe czyste ($\text{SiO}_2 > 99\%$)	1000°C	1200°C	$\text{SiO}_2 > 99\%$

Źródło: opracowanie własne na podstawie specyfikacji technicznych dostawców (Europlit, Bamex, Pabiantex, VITCAS).

Należy podkreślić, że przedstawiony przegląd stanowi tylko wycinek dostępnych na rynku produktów i ich możliwych modyfikacji. Specyfika oraz zakres modyfikacji każdego produktu zależy głównie od wymagań stawianych produktowi końcowemu. Przedstawione produkty stanowią bazę dla tworzenia rozwiązań końcowych, jak opisano wcześniej. Jednak ze względu na tajemnicę handlową dokładny zakres modyfikacji oraz sposób zastosowania włókna szklanego nie są publicznie dostępne. Wymienione firmy oraz ich przykładowe produkty bazowe stanowią składnik gotowych wyrobów ochronnych.

4.5. Przepływ ciepła przez przegrodę tekstylną – model analityczny

Podrozdział ten przedstawia teoretyczne podstawy przepływu ciepła przez układ wielowarstwowy tkanina - szczelina powietrzna – drewno, stanowiący centralny model fizyczny rozprawy. Analiza opiera się na prawie Fouriera oraz rozszerzeniach uwzględniających radiacyjny transport ciepła w materiałach porowatych. Struktura wywodu obejmuje: (a) klasyczne równanie przewodzenia ciepła i jego rozwiązania dla

układów wielowarstwowych; (b) pojęcie oporu cieplnego i analogię elektryczną; (c) efektywną przewodność cieplną materiałów tekstylnych z uwzględnieniem składowej radiacyjnej; (d) specyfikę wymiany ciepła w szczelinach powietrznych; (e) analogię mechanistyczną do wielowarstwowych układów ochrony strażaków.

Wymiana ciepła realizowana jest pod względem fizycznym na różne sposoby: przewodzenie, konwekcja i wymiana radiacyjna.

Przewodzenie to przekazywanie ciepła przez bezpośrednio stykające się materiały. Natomiast promieniowanie termiczne polega na wysyłaniu przez ciała o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego fal elektromagnetycznych, takich samych jak fala promieniowania świetlnego, lecz obejmująca cały zakres długości fali od zera do nieskończoności lub selektywnie tylko pewne wybrane długości fali. Cechą charakterystyczną radiacyjnej wymiany ciepła jest to, że nie odbywa się ona między ciałami stykającymi się, lecz między ciałami rozdzielonymi ośrodkiem przenikliwym dla promieniowania termicznego lub nawet próżnią. Radiacyjna wymiana ciepła może odbywać się również między bezpośrednio stykającymi się częściami o różnych temperaturach od źródła emitującego pochłaniającego i rozpraszającego w promieniowaniu. Często konwekcja i radiacyjna wymiana ciepła występują jednocześnie, lecz w praktyce inżynierskiej na ogół jeden z tych rodzajów wymiany ciepła przeważa nad pozostałymi, może być rozpatrywany odrębnie¹⁵⁰.

Fundamentem analizy przepływu ciepła przez dowolną przegrodę jest prawo Fouriera, sformułowane przez Jean-Baptiste Josepha Fouriera w 1822 roku w dziele *Théorie analytique de la chaleur*. W przypadku jednowymiarowego, ustalonego przepływu ciepła przez płaską ścianę jednorodną gęstość strumienia cieplnego q wyrażona jest wzorem:

$$q = -\lambda \cdot (dT/dx) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (9)$$

gdzie:

q - gęstość strumienia cieplnego [W/m²], tj. ilość ciepła przepływającego przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu;

λ - współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna) materiału [W/(m·K)];

dT/dx - gradient temperatury w kierunku przepływu ciepła [K/m];

znak minus (–) wskazuje, że ciepło płynie w kierunku malejącej temperatury.

¹⁵⁰ S. Wiśniewski, T.S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*, wyd. 6, PWN, Warszawa 2023.

Przy rozpatrywaniu przewodzenia ciepła przez ścianę płaską wielowarstwową prostopadle do kierunku gęstości strumienia ciepła numerowanych kolejno $i=1,2,3, \dots, n$, o grubościach δ_i oraz współczynnikach przewodzenia ciepła λ_i przyjmuje się, że warstwy stykające się idealnie, czyli mające na powierzchni styku te same temperatury. Gdy przewodzenie ciepła jest ustalone, gęstości strumienia ciepła są w każdej warstwie jednakowe.

$$q = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{si} - T_{s(i+t)}) \quad (10)$$

Sumowanie różnic temperatur dla każdej z n warstw

$$(T_{si} - T_{s(i+t)}) = q \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (11)$$

Skąd otrzymujemy gęstość strumienia ciepła przewodzonego przez ściankę płaską n -warstwową.

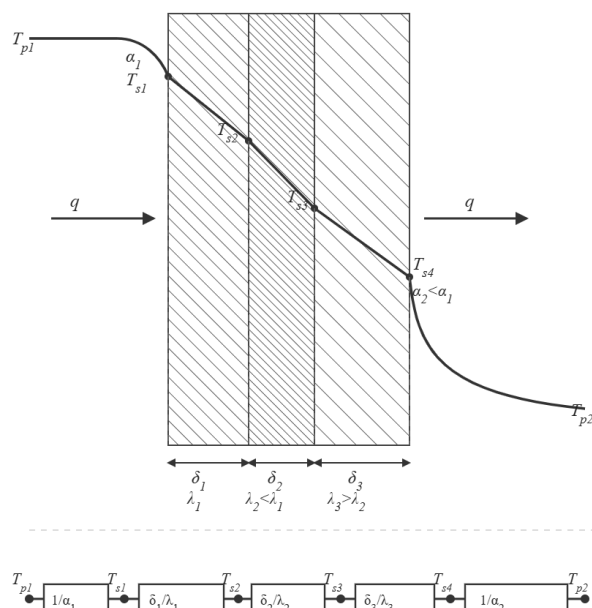
$$q = \frac{T_{si} - T_{s(i+t)}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (12)$$

gdzie T_{si} oraz $T_{s(i+t)}$ są to temperatury zewnętrznych powierzchni pierwszej i ostatniej (n -tej) warstwy.

Opór przewodzenia ciepła przez ściankę płaską wielowarstwową jest równy sumie oporu przewodzenia ciepła przez poszczególne warstwy.

$$r_{\lambda p} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n r_{\lambda pi} \quad (13)$$

Poniżej przedstawiona zależność graficzna między temperaturami, a cieplnymi oporami właściwymi.



Rysunek 23. Przenikanie ciepła przez ściankę płaską wielowarstwową¹⁵¹

4.5.1. Jednostkowy opór cieplny

Jednostkowy opór cieplny stanowi kluczowy parametr charakteryzujący zdolność materiału do hamowania przepływu ciepła. W przypadku tkanin technicznych stosowanych jako osłony ogniochronne opór ten determinuje czas, przez który chroniony element konstrukcyjny pozostaje w bezpiecznym zakresie temperatur. Tkaniny na bazie włókna szklanego wykazują szczególnie korzystne właściwości termiczne ze względu na unikalną strukturę porowatą, w której zamknięte pęcherzyki powietrza tworzą dodatkową barierę izolacyjną.

Efektywna przewodność cieplna tkanin włókienniczych zależy od trzech współistniejących mechanizmów transportu ciepła: przewodzenia przez fazę stałą (włókna), przewodzenia przez gaz wypełniający pory oraz promieniowania termicznego pomiędzy włóknami.

Jednostkowy opór cieplny właściwy warstwy jednorodnej [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] zdefiniowany jest wzorem:

$$r_{\lambda p} = R_{\lambda p} A = \frac{\delta}{\lambda} [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (14)$$

¹⁵¹ T.S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków*, ITC Warszawa 2016.

Przykładowe obliczenie jednostkowego oporu cieplnego

Przykładowe obliczenie dla tkaniny E-glass surowej o gramaturze 700 - 1000 g/m² i grubości d = 1 mm

$$R_{E-glass} = \frac{0,001}{0,037} = 0,027 [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

Wartość $\lambda_{eff} = 0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$: środek przedziału dla E-glass surowego

Dla porównania: płyta GKF o grubości 12,5 mm i $\lambda = 0,17\text{--}0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ daje:

$$R_{GKF} = \frac{0,0125}{0,019} = 0,0658 [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

przy masie jednostkowej 8 - 11 kg/m² wobec 0,7 - 1,25 kg/m² dla tkaniny szklanej.

Relacja ta stanowi argument za stosowaniem lekkich osłon tekstylnych w aplikacjach, gdzie masa własna zabezpieczenia ma istotne znaczenie np. w ochronie istniejących konstrukcji drewnianych o ograniczonej nośności.

4.5.2. Wpływ szerokości szczeliny powietrznej

W rzeczywistych warunkach zastosowania tkanin technicznych jako osłon ogniochronnych konstrukcji drewnianych nieuniknione jest występowanie szczelin powietrznych między tkaniną a powierzchnią chronionego elementu. Szczeliny te powstają zarówno w wyniku niedoskonałości montażu, jak i celowych rozwiązań konstrukcyjnych, np. przy zastosowaniu dystansów lub listew mocujących. Zrozumienie roli warstwy powietrznej w przepływie ciepła ma fundamentalne znaczenie dla właściwego projektowania i oceny skuteczności osłon tekstylnych.

Zagadnienie to zostało szczegółowo zbadane w kontekście wielowarstwowych układów ochronnych stosowanych w odzieży strażackiej, gdzie szczelina powietrzna między warstwami ubioru pełni analogiczną funkcję do szczeliny między tkaniną osłonową a powierzchnią drewna. Doświadczenia i modele opracowane dla odzieży ochronnej stanowią cenny punkt odniesienia dla analizy układu tkanina - szczelina - drewno.

Mechanizmy wymiany ciepła w szczelinie powietrznej

Przepływ ciepła przez szczelinę powietrzną odbywa się trzema mechanizmami: przewodzeniem przez nieruchome powietrze, konwekcją naturalną (gdy różnica temperatur wzbudza ruch powietrza) oraz promieniowaniem między przeciwległymi powierzchniami. Udział poszczególnych mechanizmów zależy od szerokości szczeliny, różnicy temperatur i emisyjności powierzchni granicznych. Wiśniewski w podręczniku *Wymiana ciepła* szczegółowo omawia zagadnienie konwekcji swobodnej między równoległymi powierzchniami płaskimi oraz w przestrzeniach zamkniętych, podkreślając, że dla małych szczelin dominuje przewodzenie ciepła, natomiast powyżej pewnej szerokości krytycznej pojawia się ruch konwekcyjny powietrza intensyfikujący wymianę ciepła¹⁵².

4.5.3. Ograniczenie migracji gazów pożarowych jako efekt addytywny

Tkaniny szklane z powłoką silikonową lub poliuretanową (szczelność gazowa) ograniczają przepływ gazów pirolizy (CO, CH₄, substancje smołowe) przez barierę do strefy spalania po stronie zewnętrznej tkaniny. Przytoczone już badania potwierdzają ten mechanizm dla układu tkanina - drewno, wskazując na zmniejszenie dostępności gazowego paliwa dla płomieni jako efekt addytywny wobec roli izolacyjnej. Efekt ten zaobserwowano jakościowo podczas próby poligonowej (rozdz. dotyczący badań pełnoskalowych). Ilościowa ocena redukcji migracji gazów pozostaje poza zakresem przedmiotowej pracy i jest wskazana jako kierunek dalszych badań. Warto zauważyć, że efekt blokowania można rozważać na dwóch płaszczyznach jako efekt pozytywny ograniczający dopływ produktów pirolizy do sfery spalania, w szczególności w bezpośredniej bliskości chronionego elementu. W początkowej fazie pożaru, gdzie nie mamy spalania w całej przestrzeni pomieszczenia oraz jako negatywny wpływ, gdzie w sposób gwałtowny produkty pirolizy przedostają się do strefy spalania, co miało miejsce w czasie próby poligonowej dla jednego z materiałów w czasie rozerwania osłony w końcowej fazie pożaru testowego.

4.6. Podsumowanie rozdziału i wnioski dla programu badawczego

Przedstawione w powyższym rozdziale podstawy teoretyczne w zakresie wymiany ciepła w układach tekstylnych oraz obszary obecnie stosowanych tkanin technicznych w ochronie przeciwpożarowej dają solidne podstawy do dalszych rozdziałów. W części

¹⁵²S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła...*, s. 281–286.

dotyczącej badania laboratoryjnego oraz poligonowego ze wskazaniem na obszary, które powinny zostać poddane dalszej analizie, w szczególności wpływ szczeliny powietrznej na właściwości ochronne tkanin w ujęciu zabezpieczeń elementów drewnianych oraz znaczenia lokalnej zmiany głębokości zwęglenia związanej z bezpośrednim przyleganiem materiału tekstylnego do chronionego elementu, co jest analogią do układu odzieży ochronnej. Zbadane pozytywne aspekty stosowania tkanin technicznych w innych obszarach ochrony przeciwpożarowej, w tym z wykorzystaniem tkanin na bazie włókna szklanego, dają mocne podstawy do badań z zakresu wykorzystania tego sposobu ochrony w innych miejscach, jak na przykład konstrukcje drewniane.

ROZDZIAŁ 5. RAMY NORMOWE I PRAWNE OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ KONSTRUKCJI DREWNIANYCH

5.1. Europejski i krajowy system klasyfikacji ogniowej

Europejski system klasyfikacji ogniowej wyrobów budowlanych został ustanowiony na mocy rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011, znanego jako Construction Products Regulation (CPR)¹⁵³. Rozporządzenie to wprowadziło zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych na terenie Unii Europejskiej, w tym jednolity system klasyfikacji reakcji na ogień i odporności ogniowej.

Klasyfikacja reakcji na ogień wyrobów budowlanych regulowana jest normą PN-EN 13501-1, która wprowadza siedem klas głównych: A1, A2, B, C, D, E oraz F¹⁵⁴. Klasy A1 i A2 obejmują wyroby niepalne lub o bardzo ograniczonej palności, podczas gdy klasy B do E określają stopniowo rosnącą palność materiałów. Ponadto norma wprowadza klasyfikację dodatkową dotyczącą wydzielania dymu (s1, s2, s3) oraz tworzenia płonących kropel (d0, d1, d2). Drewno lite iglaste, będące przedmiotem niniejszej pracy, klasyfikowane jest zazwyczaj jako D-s2,d0, co oznacza materiał palny o umiarkowanym wydzielaniu dymu i nietworzący płonących kropel.

Należy odróżnić pojęcie odporności ogniowej elementu od pojęcia odporności pożarowej budynku. Odporność ogniowa jest cechą elementu budowlanego i wyrażana jest w minutach (np. R60, REI120), podczas gdy odporność pożarowa budynku jest kategorią przypisaną całemu obiektowi na podstawie jego przeznaczenia, wysokości i kategorii zagrożenia ludzi lub gęstości obciążenia ogniowego. Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych ustanawia pięć klas odporności pożarowej budynków, oznaczonych literami od A (najwyższa) do E (najniższa)¹⁵⁵. Klasa odporności pożarowej determinuje minimalne wymagania odporności ogniowej dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych budynku. Natomiast podejście normowe określające zasady projektowania konstrukcji drewnianych w warunkach pożaru określa norma Eurokod 5

¹⁵³Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych (CPR), Dz. Urz. UE L 88/5.

¹⁵⁴ PN-EN 13501-1:2019-02 Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień, Warszawa 2019.

¹⁵⁵Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych...,

część 1-2 (EN 1995-1-2) i stanowi podstawowy dokument projektowy dla konstrukcji drewnianych w warunkach pożarowych, został on omówiony w poprzednich rozdziałach pracy.

Metody badawcze do wyznaczania wpływu zabezpieczeń ogniowych na elementy drewniane określone są w normie PN-EN 13381-7¹⁵⁶. Norma ta definiuje procedury badawcze dla różnych typów zabezpieczeń, w tym okładzin płytowych, powłok pęczniejących oraz membran ochronnych. Wyniki badań pozwalają na określenie współczynnika opóźnienia zwęglonego oraz czasu ochrony zapewnianego przez dane zabezpieczenie. Norma ISO 23932-1 dostarcza ogólnych zasad inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, stanowiąc ramy dla oceny ryzyka i projektowania systemów ochrony¹⁵⁷.

Należy podkreślić, że nie można zapomnieć o wytycznych zagranicznych dotyczących zabezpieczenia np. obiektów zabytkowych NFPA wytyczne nr 914, 909.

5.2. Polskie przepisy krajowe dotyczące bezpieczeństwa pożarowego budynków

Podstawowym aktem prawnym regulującym wymagania bezpieczeństwa pożarowego budynków w Polsce jest *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*¹⁵⁸. Rozporządzenie to w dziale VI określa wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego, w tym klasy odporności pożarowej budynków, wymagania dla elementów konstrukcyjnych oraz zasady podziału na strefy pożarowe.

Paragraf 216. Rozporządzenia określa minimalne wymagania odporności ogniowej dla poszczególnych elementów budynku w zależności od klasy odporności pożarowej¹⁵⁹.

Istotne znaczenie dla pracy ma §2. Rozporządzenia, który wprowadza możliwość stosowania rozwiązań zamiennych. Zgodnie z ust. 2, przy nadbudowie, rozbudowie, przebudowie i zmianie sposobu użytkowania budynków istniejących dopuszcza się rozwiązania inne niż określone w rozporządzeniu, zapewniające nie pogorszenie warunków bezpieczeństwa pożarowego¹⁶⁰. Rozwiązania te wymagają uzgodnienia z właściwym komendantem wojewódzkim Państwowej Straży Pożarnej. Przepis ten

¹⁵⁶PN-EN 13381-7:2019-07 Metody badań do wyznaczania wpływu zabezpieczeń ogniowych na elementy konstrukcyjne. Część 7: Zabezpieczenia elementów drewnianych.

¹⁵⁷ ISO 23932-1:2018 *Fire safety engineering. General principles. Part 1: General*, ISO,

¹⁵⁸Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych...

¹⁵⁹Tamże, par. 216 ust. 1.

¹⁶⁰Tamże, par. 2 ust. 2.

otwiera drogę do stosowania innowacyjnych rozwiązań ochrony przeciwpożarowej, w tym tkanin technicznych. Ekspertyzy techniczne sporządza się w przypadku budynków istniejących, gdy spełnienie wymagań Rozporządzenia jest niemożliwe lub niecelowe ze względów technicznych lub użytkowych¹⁶¹. Ekspertyza taka musi być wykonana przez Rzeczoznawcę budowlanego i Rzeczoznawcę do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych. Ekspertyza powinna zawierać analizę stanu istniejącego, wskazanie zagrożeń oraz propozycje rozwiązań zapewniających odpowiedni poziom bezpieczeństwa¹⁶².

Opisany powyżej dokument ze względu na konieczność spełnienia wymagań w inny sposób niż mówią o tym obowiązujące przepisy techniczno – budowlane, daje możliwość zaproponowania nowatorskich rozwiązań, analizując specyfikę obiektu, ryzyko powstania pożaru oraz możliwe do zastosowania rozwiązania nie pogarszające poziomu bezpieczeństwa w analizowanym obiekcie.

5.3. Rozwiązania zamiennie i ekspertyzy techniczne jako ścieżka dla innowacyjnych metod ochrony

Instytucja rozwiązań zamiennych stanowi kluczowy mechanizm prawny umożliwiający stosowanie innowacyjnych metod ochrony przeciwpożarowej w budynkach istniejących, szczególnie w obiektach zabytkowych. Nabiera ona szczególnego znaczenia w sytuacjach, gdy konstrukcja budynku już istnieje i nie może być zmieniana, a dostępne na rynku systemy zabezpieczeń ogniochronnych nie umożliwiają zastosowania ze względów technicznych, konserwatorskich lub ekonomicznych. Zgodnie z §2. ust. 2. rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, rozwiązania zamiennie mogą być stosowane przy nadbudowie, rozbudowie, przebudowie i zmianie sposobu użytkowania budynków istniejących¹⁶³. Warunkiem dopuszczalności jest zapewnienie nie pogorszenia warunków bezpieczeństwa pożarowego.

Podstawa prawna dla stosowania rozwiązań zamiennych wywodzi się również z art. 5. ust. 1. pkt 1. lit. b ustawy Prawo budowlane, który wymaga zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego, jednak nie precyzuje sposobu jego osiągnięcia¹⁶⁴. Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych w par. 207. ust. 2. stanowi, że

¹⁶¹Tamże, par. 2 ust. 3.

¹⁶²Tamże, par. 2 ust. 3a.

¹⁶³Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r., op. cit., par. 2 ust. 2.

¹⁶⁴Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, t.j. Dz.U. 2024 poz. 725, art. 5 ust. 1 pkt 1 lit. c.

budynek i urządzenia z nim związane powinny być zaprojektowane i wykonane w sposób zapewniający w razie pożaru:

- nośność konstrukcji przez czas wynikający z rozporządzenia,
- ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu w budynku,
- ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie budynki i możliwość ewakuacji ludzi,
- a także uwzględniać bezpieczeństwo ekipy ratowniczej¹⁶⁵.

Przepisy te nie ograniczają jednak sposobów osiągnięcia wymaganego poziomu bezpieczeństwa do zamkniętego katalogu rozwiązań. Nie mamy tu pełnej dowolności, ponieważ zgodnie z §208.2. narzuca konieczność stosowania m.in. Polskich Norm dotyczących klasy odporności ogniowej budynku, stopnia rozprzestrzeniania ognia przez elementy budynku, niepalności i stopnia palności.

Procedura wprowadzenia rozwiązania zamiennego wymaga sporządzenia ekspertyzy technicznej przez rzeczoznawcę budowlanego oraz rzeczoznawcę do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych¹⁶⁶. Ekspertyza powinna zawierać szczegółową analizę stanu istniejącego budynku, identyfikację zagrożeń pożarowych oraz uzasadnienie proponowanego rozwiązania wraz z oceną jego skuteczności¹⁶⁷. W przypadku obiektów zabytkowych ekspertyza wymaga dodatkowo uzgodnienia z właściwym wojewódzkim konserwatorem zabytków¹⁶⁸.

Komendant Wojewódzkiej Państwowej Straży Pożarnej właściwy dla miejsca lokalizacji inwestycji, na uzasadniony ekspertyzą techniczną wniosek inwestora lub właściciela obiektu budowlanego, wydaje postanowienie w sprawie rozwiązań zamiennych¹⁶⁹. Postanowienie to może: wyrazić zgodę na zastosowanie rozwiązań zamiennych, wyrazić zgodę pod warunkiem spełnienia dodatkowych wymagań

¹⁶⁵Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych...

¹⁶⁶Tamże, par. 2 ust. 3.

¹⁶⁷Tamże, par. 2 ust. 3a.

¹⁶⁸Tamże, par. 2 ust. 4.

¹⁶⁹Rozporządzenie MSWiA z dnia 5 sierpnia 2023 r. w sprawie uzgadniania projektu budowlanego pod względem ochrony przeciwpożarowej, Dz.U. 2023 poz. 1563.

określonych w postanowieniu albo nie wyrazić zgody na zastosowanie rozwiązań zamiennych.

Wytyczne Komendy Głównej PSP w sprawie uzgadniania rozwiązań zamiennych wskazują, że wpływ na dobór rozwiązań zamiennych mogą mieć takie elementy jak: lokalizacja najbliższej jednostki ratowniczo-gaśniczej PSP, funkcjonowanie w budynku sprawnego systemu sygnalizacji pożaru z monitoringiem do PSP, spełnienie wymagań ewakuacyjnych, dogodny dostęp operacyjny do obiektu oraz możliwość podawania wody bezpośrednio ze sprzętu pożarniczego¹⁷⁰. Rozwiązania zamienne powinny być rozpatrywane indywidualnie dla każdego obiektu, z uwzględnieniem jego specyfiki i uwarunkowań lokalnych¹⁷¹.

W praktyce inżynierskiej rozwiązania zamienne znajdują zastosowanie w wielu typowych sytuacjach:

- gdy niemożliwe jest osiągnięcie wymaganej klasy odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych przy zachowaniu istniejących elementów budowlanych,
- gdy drogi ewakuacyjne nie spełniają wymagań geometrycznych określonych w przepisach,
- gdy nie ma możliwości wykonania podziałów na strefy pożarowe w miejscach wynikających z przepisów,
- gdy obiekt zabytkowy nie może być poddany typowym robotom budowlanym,
- gdy specyfika użytkowania budynku uniemożliwia zastosowanie standardowych rozwiązań.

W każdym z tych przypadków ekspertyza techniczna musi wykazać, że proponowane rozwiązanie zapewni poziom bezpieczeństwa pożarowego nie niższy niż rozwiązanie wymagane przepisami¹⁷².

Ocena skuteczności rozwiązań zamiennych opiera się na dwóch głównych metodologiach. Metody opisowe (jakościowe) wymagają wykazania równoważności

¹⁷⁰Komenda Główna PSP, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń, Wytyczne w sprawie uzgadniania rozwiązań zamiennych, KG PSP.

¹⁷¹Tamże.

¹⁷²Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych..., par. 2 ust. 2 w zw. z par. 207 ust. 2.

funkcjonalnej, innymi słowy, proponowane rozwiązanie musi realizować te same cele bezpieczeństwa co rozwiązanie przepisane. Metody obliczeniowe (ilościowe) natomiast wykorzystują zaawansowaną inżynierię bezpieczeństwa pożarowego do kwantyfikacji ryzyka i udowodnienia, że osiągnięty poziom ochrony jest akceptowalny.

Praktyczne zastosowanie tych metodologii ilustruje przykład biernej ochrony przeciwpożarowej drewna za pomocą tkanin technicznych. W tym przypadku skuteczność wykazuje się poprzez badania empiryczne określające zarówno czas trwania ochrony, jak i współczynnik opóźnienia procesu zwęglenia drewna.

Możliwe i celowe jest też wykorzystanie modelowania numerycznego jako potwierdzenie pozytywnego wpływu zastosowanych osłon. Jednak przygotowanie walidowalnego modelu CFD wymaga wsparcia badaniami laboratoryjnymi i pełnoskalowymi.

Szczególną rolę rozwiązania zamiennie odgrywają w przypadku budynków, w których występują niezgodności pomiędzy stanem istniejącym a wymaganiami przepisów techniczno-budowlanych. Sytuacja ta staje się szczególnie krytyczna, jeśli warunki techniczno - budowlane stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników¹⁷³. W takich przypadkach rzeczoznawca powinien zaproponować rozwiązania pozwalające co najmniej na przeprowadzenie bezpiecznej ewakuacji ludzi z budynku. Ekspertyza powinna wymienić nieprawidłowości występujące w budynku z podziałem na te, które zostaną usunięte oraz na te, które z różnych powodów (głównie technicznych) pozostaną nieusunięte. W zamian za nieprawidłowości, które będą dalej występować, rzeczoznawca proponuje warunki zastępcze lub zamiennie mające na celu spełnienie wymagań ochrony przeciwpożarowej w inny sposób niż określony w warunkach techniczno-budowlanych.

Dla tkanin technicznych z włókna szklanego stosowanych jako bierna ochrona przeciwpożarowa drewna, ścieżka rozwiązań zamiennych stanowi naturalną drogę wprowadzenia do praktyki budowlanej. Tkaniny te mogą być proponowane w ekspertyzie technicznej jako rozwiązanie zapewniające ochronę termiczną elementów drewnianych podczas prac wiążących się z zagrożeniem pożarowym, jako tymczasowa ochrona elementów konstrukcyjnych w czasie remontu lub przebudowy lub jako trwałe

¹⁷³Rozporządzenie MSWiA z dnia 7 czerwca 2010 r. W sprawie ochrony przeciwpożarowej..., §16.1.

zabezpieczenie w obiektach, gdzie stosowanie innych metod jest niemożliwe ze względów konserwatorskich.

Alternatywną ścieżką wprowadzenia tkanin technicznych do praktyki ochrony przeciwpożarowej jest jednostkowe dopuszczenie - procedura zatwierdzenia konkretnego rozwiązania dla określonego obiektu budowlanego. Procedura ta umożliwia znaczną elastyczność, pozwalając na wdrożenie tkanin technicznych do ochrony wybranych elementów drewnianych z pełnym uwzględnieniem indywidualnej charakterystyki budynku oraz dostępnego spektrum rozwiązań alternatywnych.

5.4. Przepisy dotyczące obiektów zabytkowych i wymagania konserwatorskie

Ochrona zabytków w Polsce regulowana jest ustawą z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami¹⁷⁴. Zgodnie z art. 4. ustawy, ochrona zabytków polega na podejmowaniu działań mających na celu zapewnienie warunków prawnych, organizacyjnych i finansowych umożliwiających trwałe zachowanie zabytków oraz ich zagospodarowanie i utrzymanie. Artykuł 36. ust. 1. pkt 1. stanowi, że prowadzenie prac konserwatorskich, restauratorskich lub robót budowlanych przy zabytku wpisanym do rejestru wymaga pozwolenia właściwego wojewódzkiego konserwatora zabytków¹⁷⁵.

Wytyczne Generalnego Konserwatora Zabytków dotyczące ochrony przeciwpożarowej obiektów drewnianych wpisanych do rejestru zabytków podkreślają konieczność stosowania rozwiązań odwracalnych i minimalizujących ingerencję w substancję historyczną¹⁷⁶. Dokument ten wskazuje, że tradycyjne metody impregnacji ogniochronnej mogą być niedopuszczalne w obiektach o szczególnej wartości historycznej ze względu na zmianę właściwości fizykochemicznych drewna oraz ryzyko uszkodzenia warstw historycznych. Zostało to w sposób jasny wskazane w pkt. C cyt. ''*należy unikać stosowania preparatów przeciwogniowych*''.

Hierarchia rozwiązań ochrony przeciwpożarowej dla obiektów zabytkowych, przedstawia się następująco: systemy detekcji i alarmowania, systemy gaśnicze o minimalnym wpływie na obiekt i jego wyposażenie (mgła wodna, gazy obojętne) oraz pasywne rozwiązania nietrwale związane z konstrukcją. Tkaniny techniczne jako

¹⁷⁴ Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, Dz.U. 2024 poz. 1292, art. 4.

¹⁷⁵ Tamże, art. 36 ust. 1.

¹⁷⁶ Wytyczne Generalnego Konserwatora Zabytków dotyczące ochrony zabytków drewnianych i konstrukcji drewnianych w obiektach zabytkowych, DOZ-KiNK.6521.13.2021

elementy odwracalne i nienaruszające struktury drewna wpisują się w tę hierarchię jako rozwiązanie szczególnie odpowiednie dla obiektów zabytkowych.

Norma NFPA 914 Code for the Protection of Historic Structures stanowi międzynarodowy punkt odniesienia dla ochrony przeciwpożarowej obiektów zabytkowych¹⁷⁷. Dokument ten promuje podejście oparte na analizie ryzyka oraz stosowanie rozwiązań proporcjonalnych do wartości chronionego obiektu i poziomu zagrożenia.

5.5. Umieszczenie tkanin technicznych w kontekście normowym

Podstawy naukowe dla oceny skuteczności tkanin technicznych jako barier termicznych dostarczają badania dotyczące zachowania drewna w warunkach pożarowych opisane we wcześniejszej części pracy.

Badania Takahashiego wykazały skuteczność „koców gaśniczych” w ochronie konstrukcji drewnianych przed pożarami zewnętrznymi,¹⁷⁸. Tsapko i współpracownicy w serii publikacji analizowali rozkład temperatur w drewnie chronionym barierą tekstylną, wykazując istotne opóźnienie zwęglenia¹⁷⁹.

Tkaniny techniczne z włókna szklanego spełniają kryteria odwracalności, co czyni je szczególnie atrakcyjnym rozwiązaniem dla obiektów o wysokiej wartości historycznej, gdzie ingerencja w substancję musi być minimalizowana.

W aspekcie zabezpieczenia elementów drewnianych większość publikacji oraz badań skupia się na elementach budowlanych, stanowiących część konstrukcji nośnej. Jednak narażone są także inne kategorie elementów drewnianych.

Pożary obiektów zabytkowych wskazują na konieczność uwzględnienia w planach ochrony również elementów drewnianych o znaczeniu historycznym i materialnym, zarówno nieruchomych, jak i ruchomych, stanowiących mienie zabytkowe. Dotyczy to szczególnie elementów, których ze względów praktycznych nie można szybko ewakuować z zagrożonego obiektu. Dostępne rozwiązania biernej ochrony nie spełniają wymogów szybkiego, tymczasowego zabezpieczenia takich elementów.

¹⁷⁷ NFPA 914:2023 *Code for the Protection of Historic Structures*, NFPA, Quincy 2023.

¹⁷⁸ F. Takahashi, *Whole-House Fire Blanket...*

¹⁷⁹ Y. Tsapko [i in.], *Defining Patterns of Heat ...*, s. 49-56.

Problematyka ta została szeroko omówiona w opracowaniu pt. *Bezpieczeństwo pożarowe obiektów muzealnych i ich zbiorów* w pkt. 4.3.¹⁸⁰. Zabezpieczenie elementów drewnianych nie tylko konstrukcyjnych, ale i też mienia ruchomego rozpoczyna się już dużo wcześniej na etapie opracowywania planów reagowania na możliwe sytuacje zagrożenia m.in. pożar. Dlatego przygotowanie z wyprzedzeniem gotowych tkanin z modyfikowanymi powłokami dla danego zabezpieczanego elementu może być jedynym możliwym zabezpieczeniem elementów zabytkowych. Stanowi to nowy kierunek badawczy, poparty wstępnymi wynikami badań laboratoryjnych i badań pełnoskalowych, które zostały wykonane w ramach niniejszej pracy.

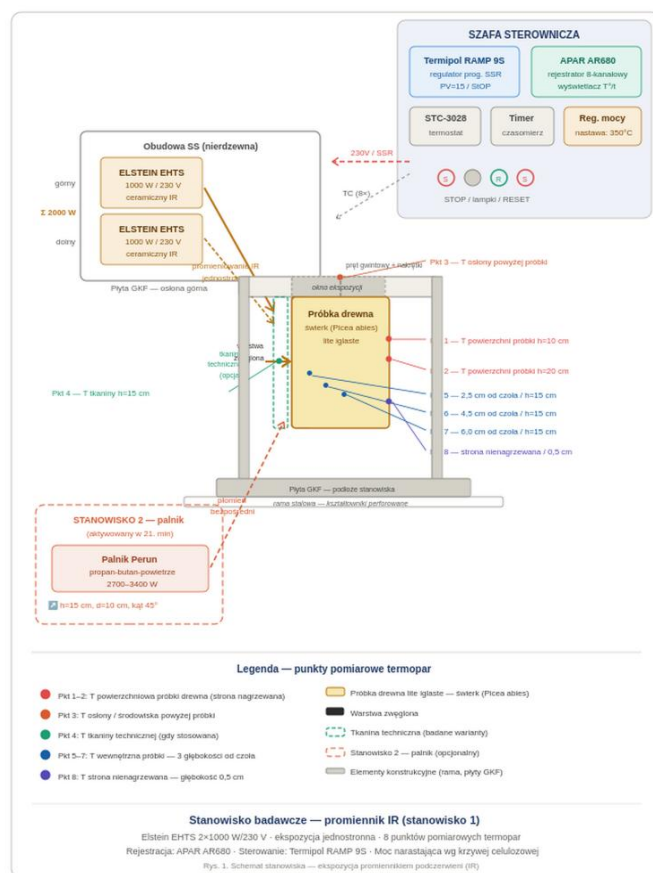
¹⁸⁰ J. Zbojna [i in], *Bezpieczeństwo pożarowe obiektów muzealnych i ich zbiorów*. Wydawnictwo CNBOP-PIB.

ROZDZIAŁ 6. METODYKA BADAŃ — PROJEKT STANOWISK, DOBÓR MATERIAŁÓW I APARATURA POMIAROWA

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodykę badawczą opracowaną na potrzeby oceny skuteczności tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako bariery termicznej chroniącej elementy z drewna litego iglastego przed oddziaływaniem pożaru. Metodyka stanowi realizację założeń sformułowanych w rozdziale poświęconym problemowi badawczemu i obejmuje:

- dobór i przygotowanie materiału badawczego (próbki drewna i tkaniny),
- projekt oraz budowę stanowisk laboratoryjnych,
- system pomiarowy i procedury eksperymentalne.

Przyjęta strategia badawcza zakłada dwustopniową weryfikację skuteczności osłon tekstylnych: badania laboratoryjne z kontrolowanymi źródłami ciepła (promiennik IR i otwarty płomień), badania poligonowe w warunkach zbliżonych do rzeczywistego pożaru.



Rysunek 24. Schemat blokowy stanowiska. Opracowanie własne

6.1 Koncepcja programu badawczego

Program badawczy został zaprojektowany tak, aby umożliwić systematyczną ocenę wpływu osłon tekstylnych na przebieg procesu zwęglania drewna litego iglastego. W przeciwieństwie do standardowych badań odporności ogniowej prowadzonych w piecach laboratoryjnych przyjęta metodyka opiera się na uproszczonych stanowiskach badawczych, umożliwiających kontrolowane oddziaływanie termiczne z jednoczesnym monitoringiem rozkładu temperatury w przekroju próbki.

Takie podejście wynika z kilku przesłanek. Po pierwsze, celem badań nie jest formalna klasyfikacja ogniowa tkanin, lecz poznanie mechanizmów ochrony termicznej i wpływu parametrów tkaniny na dynamikę zwęglania. Po drugie, stanowiska uproszczone umożliwiają przeprowadzenie większej liczby prób w warunkach powtarzalnych, co ma istotne znaczenie dla analizy statystycznej uzyskanych wyników. Po trzecie, przyjęta konfiguracja pozwala na porównanie dwóch mechanizmów oddziaływania termicznego: promieniowania (stanowisko IR) oraz promieniowania i płomienia otwartego (stanowisko z palnikiem).

6.1.1 Strategia badawcza

Etap - I badania laboratoryjne z wykorzystaniem dwóch stanowisk: promiennika podczerwieni (odwzorowanie składu promieniowania krzywej celulozowej) oraz otwartego płomienia (bezpośredni kontakt z gazami pożarowymi). Celem jest określenie wpływu tkaniny na profil termiczny w przekroju próbki i głębokość zwęglania w warunkach kontrolowanych.

W ramach tego etapu analizowane będą także uszkodzenia tkaniny osłonowej, co stanowi istotną informację dla oceny trwałości i wielokrotnego użycia osłon.

Etap - II badania poligonowe prowadzone w warunkach zbliżonych do rzeczywistego pożaru. Celem jest weryfikacja wyników laboratoryjnych w warunkach dynamicznie zmiennego oddziaływania termicznego. Ze względu na ograniczenia obiektowe pożar został przeprowadzony w otwartej przestrzeni z minimalizacją wpływu warunków atmosferycznych.

6.1.2 Zmienne niezależne, zależne i kontrolowane

W przyjętym układzie eksperymentalnym wyróżniono następujące kategorie zmiennych:

Zmienne niezależne (manipulowane): typ osłony tekstylnej (brak osłony próbka referencyjna; tkanina szklana bez powłoki; tkanina z powłoką aluminiową; tkanina z powłoką wermikulitową), rodzaj ekspozycji termicznej (promiennik IR vs. otwarty płomień), czas ekspozycji.

Zmienne zależne (mierzone): temperatura w 8 punktach pomiarowych (profil termiczny), głębokość zwęglania mierzona po ekspozycji (metody: suwmiarka i opracowany przybornik),

Zmienne kontrolowane (utrzymywane na stałym poziomie): gatunek drewna (świerk pospolity - *Picea abies*), wilgotność próbek ($12 \pm 2\%$ - stan powietrznosuchy), orientacja słoików (styczna), wymiary próbek, warunki otoczenia (temperatura $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna $50 \pm 10\%$).

6.2 Dobór i przygotowanie materiału badawczego

6.2.1 Próbki drewna — gatunek, wymiary, sezonowanie

Do badań wybrano drewno świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) pochodzące z obszaru Beskidu Wyspowego, z masywu góry Łopień (południowa Polska). Drewno zostało pozyskane w okresie uśpionej wegetacji (styczeń), co z doświadczenia autora wpływa pozytywnie na trwałość materiału i minimalizuje naturalne wady, takie jak skręt podłużny i pęknięcie wzdłuż włókien. Te defekty nasiliłyby się podczas intensywnej utraty wody ze struktury drewna. Przetarcie drewna nastąpiło w marcu, wykonane przy współudziale autora, aby potwierdzić niezmienną materiałową wyjściową do dalszych próbek. Po przetarciu materiału na elementy o wymiarach 8 x 16 x 650 cm był sezonowany (stan powietrzno - suchy). Po okresie ok. 12 miesięcy elementy zostały pocięte na docelowe dł. próbek tj. 160 x 80 x 250 mm i dalej już w laboratorium sezonowane do poziomu wilgotności ok. 12%. Wybór świerka pospolitego uzasadniony został kilkoma przesłankami: świerk jest jednym z najczęściej stosowanych gatunków drewna konstrukcyjnego w Polsce¹⁸¹, jego właściwości termiczne i prędkość zwęglania są dobrze udokumentowane w literaturze¹⁸², dostępność jednolitej partii surowca umożliwiła ograniczenie zmienności właściwości materiałowych między próbkami.

Próbki na żadnym etapie nie były dodatkowo obrabiane mechanicznie (poprzez szlifowanie, struganie lub inną obróbkę). Miało to na celu odwzorowanie rzeczywistych

¹⁸¹ P. Kozakiewicz, *Klimat a drewno zabytkowe...*, s. 67–85.

¹⁸² P. Sulik, *Prędkość zwęglania wybranych...*, s. 38–42.

warunków, ponieważ w tej postaci elementy więźby dachowej najczęściej występują w konstrukcjach ciesielskich.

Przyjęto orientację styczną słoju względem eksponowanej powierzchni, co odpowiada najczęstszej konfiguracji w elementach konstrukcyjnych. Jak wykazano we wcześniejszych rozdziałach, orientacja słoju ma bardzo duże znaczenie dla głębokości zwęglania i stanowi standardową konfigurację dla prawidłowego przenoszenia obciążeń w elementach nośnych. Sezonowanie próbek prowadzono w laboratorium, w którym wykonywane były docelowe badania przez okres ok. trzech miesięcy (od momentu pocięcia na docelową dł. próbek). Docelowa wilgotność wynosiła $12 \pm 2\%$.

Przed włączeniem do programu badawczego każdą próbkę poddano ocenie wizualnej pod kątem obecności wad strukturalnych (sęki przechodzące przez powierzchnię eksponowaną, pęknięcia, zasinienie, zewnętrzne ślady żywicy). Próbki wykazujące widoczne wady opisane powyżej zostały odrzucone.

Dodatkowo odrzucono próbki wykazujące duże pęknięcia na stronie nieeksponowanej, z obawy przed powstaniem pęknięć pogłębiających się podczas badania lub deformacją próbki.

Kryteria odrzucenia próbek obejmowały:

- sęki o średnicy powyżej 20 mm na eksponowanej powierzchni,
- pęknięcia o długości powyżej 30 mm,
- widoczne zasinienie drewna lub jego przebarwienia.

Analizie poddano również płaszczyznę próbki narażoną na działanie czynników badawczych. Próbki z odchyleniami płaszczyzny (wyboczenie lub wklęsnięcie) przekraczającymi 3 mm zostały odrzucone, ponieważ kryterium to ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia prawidłowego przylegania osłony i równomiernej szczeliny powietrznej między materiałem osłonowym a powierzchnią drewna.

W trakcie selekcji odrzucono 32% ogółu przygotowanych próbek. Główne przyczyny odrzuceń to: (1) obecność dużych sęków na powierzchni eksponowanej, (2) nierówności płaszczyzny eksponowanej.

Tabela 8. Typowe wady drewna dyskwalifikujące próbki zbadania

Rodzaj wady próbki	Zdjęcie wady próbki
Duże sęki poza zakresem przyjętego ograniczenia badawczego	
Ubytki materiału próbki	
Wyboczenie – deformacja próbki od strony ekspozycji	

Źródło: Opracowanie własne autora

W trakcie weryfikacji próbek zakwalifikowanych do badań kontrolowano również ich wymiary. Wymiary powierzchni eksponowanej (płaszczyzna poddawana działaniu czynników badawczych) były najistotniejszymi parametrami.

Na podstawie praktyki doświadczalnej ustalono, że dopuszczalne odchylenia wymiarów to ± 4 mm dla szerokości i wysokości próbki. Tolerancja ta wynika z naturalnego zmniejszania się wymiarów próbek w trakcie oddawania wilgoci ze struktury drewna.

Zaakceptowane szczeliny powstałe na styku między osłoną stanowiska badawczego a próbką były podczas badań wypełniane masą pęczniącą wykorzystywaną w biernej ochronie przeciwpożarowej. Procedura ta zabezpieczała próbkę przed przegrzewaniem bocznym i przed zniekształceniami wyników pomiarów temperatury oraz głębokości zwęglania.

6.2.2 Tkaniny techniczne - kryteria wyboru i charakterystyka

Do programu badawczego wytypowano cztery warianty tkanin technicznych z włókna szklanego typu E. Materiały te dostępne są na rynku polskim jako produkty przemysłowe przeznaczone do izolacji termicznych, osłon spawalniczych i ochrony przeciwpożarowej.

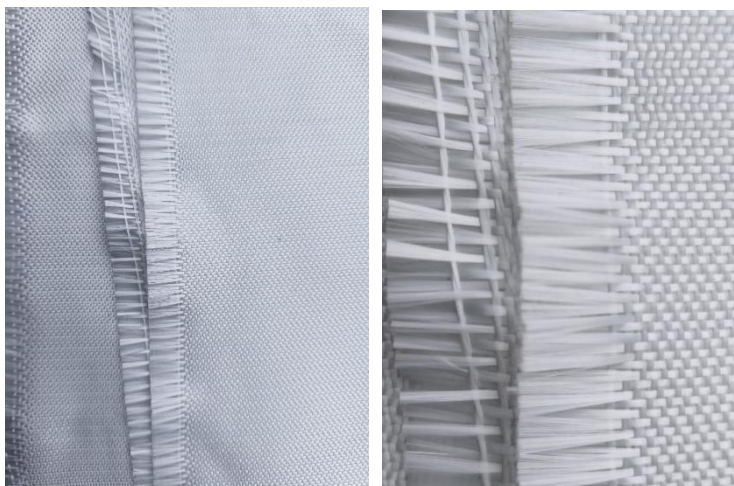
Wybór konkretnych wariantów tkanin został uzasadniony trzema kryteriami technicznymi: (1) temperatura pracy ciągłej powyżej 500°C, zapewniająca odporność termiczną materiału w warunkach pożarowych, (2) gramatura w zakresie 530 - 1050 g/m², determinująca grubość i izolacyjność materiału, (3) dostępność w rolkach o szerokości umożliwiającej pokrycie próbek bez połączeń, co minimalizuje wpływ szczelin na wyniki pomiarów.

Dodatkowym i ważnym kryterium było kryterium ekonomiczne - cena jednostkowa materiału. Stanowiło to celowy wybór metodologiczny, mający na celu weryfikację, czy materiały tańsze mogą zapewnić zadowalający poziom ochrony. Na rynku dostępne są wprowadzone materiały, które (na podstawie kart technicznych) obiecują wyższą efektywność redukcji promieniowania termicznego i w konsekwencji lepszą ochronę przed zwęglaniem. Ich koszt jednostkowy, sięgający kilkudziesięciu złotych za metr kwadratowy, praktycznie uniemożliwia jednak szerokie wdrożenie w aplikacjach zabezpieczenia przeciwpożarowego, szczególnie w rozwiązaniach tymczasowych.

Badane tkaniny stanowią zatem kompromis między efektywnością a dostępnością ekonomiczną. Ich cena jednostkowa wyniosła 55 - 110 PLN netto za metr kwadratowy (ceny detaliczne), co czyni je realistycznym rozwiązaniem dla praktycznych zastosowań w ochronie szeroko pojmowanego mienia zabytkowego.

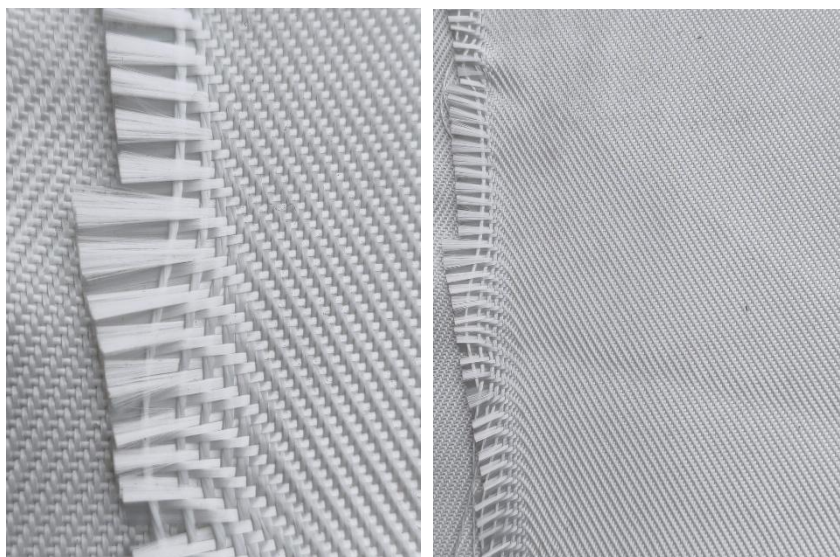
Warianty tkanin objętych badaniami:

- Wariant A - tkanina szklana bez powłoki funkcjonalnej, gramatura ok. 560 g/m², grubość 0,70 - 0,73 mm. Tkanina stanowi warstwę bazową, pozwala ocenić efekt samej struktury włóknistej jako bariery termicznej.



Rysunek 25. Tkanina szklana wariant A – opracowanie własne

- Wariant A1 - tkanina szklana bez powłoki funkcjonalnej, gramatura ok. 530 g/m², grubość 0,3 - 0,35 mm. Tkanina stanowi warstwę bazową, pozwala ocenić efekt samej struktury włóknistej jako bariery termicznej



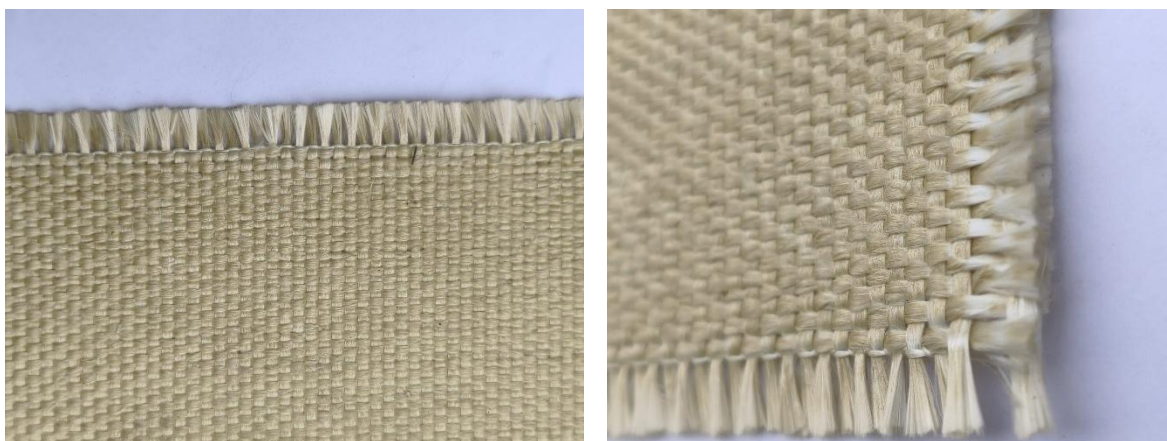
Rysunek 26. Tkanina szklana wariant A1 – opracowanie własne

- Wariant B - tkanina szklana z jednostronną powłoką aluminiową (płatki aluminium), gramatura ok. $530 \pm 30 \text{ g/m}^2$. Grubość 0,5 - 0,55 mm Powłoka aluminiowa pełni funkcję reflektora promieniowania podczerwonego.



Rysunek 27. Tkanina szklana z powłoką aluminium wariant B– opracowanie własne

- Wariant C - tkanina szklana z powłoką wermikulitową, gramatura 1050 g/m^2 . grubość 1,10 - 1,15 mm Wermikulit jako materiał intumescentny zwiększa opór cieplny warstwy i ogranicza migrację gazów.



Rysunek 28. Tkanina szklana z powłoką aluminium wariant B– opracowanie własne

6.3. Parametry charakterystyczne badanych tkanin.

Podczas przygotowania programu badawczego i doboru konkretnych materiałów do badań eksperymentalnych napotkano znaczną trudność związaną z dostępnością danych technicznych. Mimo dostępnych informacji ogólnych od producentów, nie udało się pozyskać szczegółowych parametrów fizycznych istotnych dla oceny zdolności materiału do ograniczenia przewodności ciepła. Brak tych danych bezpośrednio wpłynął

na możliwość wstępnego przewidywania efektywności badanych materiałów w kontekście głębokości zwęglania drewna oraz ich degradacji termicznej w warunkach pożarowych.

Wyznaczanie emisyjności i osłabienia promieniowania

Charakteryzacja właściwości tkanin technicznych używanych jako elementy ochrony przed działaniem promieniowania cieplnego w warunkach pożarowych wymaga precyzyjnego wyznaczenia dwóch kluczowych parametrów fizycznych: emisyjności i zdolności absorpcji (osłabienia) natężenia strumienia radiacyjnego.

Parametry te są niezbędne do oceny skuteczności materiałów w ochronie przed promieniowaniem podczerwonym w warunkach pożarowych, zwłaszcza w warunkach ekspozycji na promieniowanie o zmiennych natężeniach.

Pomiary parametrów fizycznych materiałów wykonane zostały na stanowiskach laboratoryjnych opracowanych w ramach programu badawczego dotyczącego ochrony osobistej strażaków, realizowanego na terenie Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie.

Stanowisko badawcze, dedykowane ocenie odporności próbek materiałów odzieży ochronnej na obciążenia termiczne, umożliwia wyznaczenie zarówno emisyjności powierzchni materiałów, jak i zdolności osłabienia (transmisji) promieniowania przechodzącego przez badane próbki.

Wyznaczanie parametru emisyjności (procedura badawcza)

Wyznaczenie emisyjności oparto na procedurze badawczej opracowanej w ramach szerszego programu dedykowanego wyposażeniu ochrony osobistej strażaków. Poniżej przedstawiono opis procedury pomiarowej na podstawie dokumentacji technicznej stanowiska.

Schemat urządzenia i zasilania:

Panele grzewcze zasilane są z autotransformatora poprzez mikroprocesorowy regulator napięcia. Mikroprocesorowy regulator napięcia (model LUMEN RE 16-1111000), umożliwia płynną regulację temperatury paneli grzewczych. Temperatura wewnątrz komory wyświetlana jest na panelu kontrolnym stanowiska. Komora wyposażona jest ponadto w termometr laboratoryjny o zakresie pomiarowym do 160°C.

Konfiguracja pomiarów:

Pomiary temperatury wewnętrznej osłony prowadzono za pomocą kamery termowizyjnej w zakresie 20 - 60°C. Górna granica zakresu (60°C) odpowiada progowi bólu dla skóry ludzkiej. Próbkę umocowywane były na poziomym uchwycie umieszczonym tak, aby były widoczne przez otwór w czołowej ścianie komory termicznej.

Procedura kalibracji:

Po ustabilizowaniu temperatury wewnątrz komory parametr emisyjności próbki dostrajany był w oprogramowaniu kamery termowizyjnej tak, aby wskazania kamery termowizyjnej zgadzały się z odczytami termometru laboratoryjnego wyposażonego w termoparę typu K (NiCr-NiAl).

Dokonane pomiary pozwoliły na uzyskanie uśrednionej wartości ϵ_R dla danych materiałów tekstylnych wykorzystanych następnie w próbie laboratoryjnej i poligonowej.

Uzyskane wartości dla poszczególnych materiałów:

- tkanina z włókna szklanego z powłoką z płatków aluminium $\epsilon_R = 0,86$,
- tkanina z włókna szklanego z modyfikacją wermikulitem $\epsilon_R = 0,8 - 0,81$,
- tkanina z włókna szklanego bez modyfikacji $\epsilon_R = 0,85$.



Rysunek 29. Pomiary parametru emisyjności ϵ_R dla wybranych tkanin. Opracowanie własne

Wyznaczanie zdolności osłabienia natężenia promieniowania (procedura badawcza)

Zdolność osłabienia natężenia strumienia ciepła przechodzącego przez materiały jest głównym wskaźnikiem skuteczności ochrony termicznej, zarówno w wyposażeniu ochrony osobistej, jak i w aplikacjach ochrony elementów budowlanych w warunkach pożarowych. Parametr ten wyznaczany jest poprzez bezpośredni pomiar gęstości

strumienia ciepła na obu powierzchniach próbki zewnętrznej (narażonej na promieniowanie) i wewnętrznej (zwróconej w stronę chronionego elementu).

Pomiary gęstości strumienia ciepła realizowane są przy użyciu dwóch czujników SGB01, chłodzonych wodą, przeznaczonych do pomiaru strumieni ciepła do 200 kW/m², pracujących całkowicie pasywnie dzięki zastosowaniu termostatycznego systemu chłodzenia. Czujniki charakteryzują się wysoką czułością i są szczególnie zalecane dla strumieni poniżej 50 kW/m², gdy w otoczeniu czujników można zapewnić warunki o niskiej konwekcji¹⁸³.

Procedura pomiarowa i warunki pomiaru

Pomiary parametrów optycznych prowadzone są w warunkach kontrolowanych, z precyzyjnym monitorowaniem temperatury i natężenia strumienia ciepła. Próbka materiału, o wymiarach minimalnych 100 mm × 100 mm, mocowana jest w tulejach ze stali nierdzewnej, które zapewniają równomierne napięcie powierzchni badanego materiału i eliminują artefakty pomiarowe spowodowane falowaniem lub nierównomiernym przyleganiem. Poniżej przedstawiona jest procedura badawcza, na podstawie, której wykonano określenie parametru osłabienia natężenia promieniowania dla poszczególnych próbek, które ostatecznie zostały wskazane do próby poligonowej. Pomiaru dokonujemy z wykorzystaniem rozgrzanych i wykalibrowanych wcześniej promienników, pamiętając, aby przed rozpoczęciem pomiaru ekran termiczny był podniesiony. Po zamontowaniu próbki, dosunięciu płyty stabilizującej oraz włączeniu zapisu danych do systemu akwizycji, opuszczamy ekran termiczny. Pomiar kontynuowany jest do osiągnięcia wymaganych wartości kryteriów oceny. Następnie podnoszony jest ekran termiczny¹⁸⁴.

¹⁸³ Program badawczy NCBR „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych” DOB-BIO6/04/104/2014

¹⁸⁴ Tamże.

	c. Utrzymanie wymuszenia do momentu osiągnięcia kryteriów oceny
4)	Zakończenie badania:
	a. Podniesienie ekranu termicznego
	b. Zakończenie akwizycji danych pomiarowych (po ustabilizowaniu parametrów temperaturowych)
	c. Odsunięcie płyty termicznej stabilizującej od badanej próbki elementów ochron osobistych
	d. Demontaż próbki
	e. Odłączenie zasilania stanowiska

Źródło: Program badawczy NCBR „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych” DOB-BIO6/04/104/2014

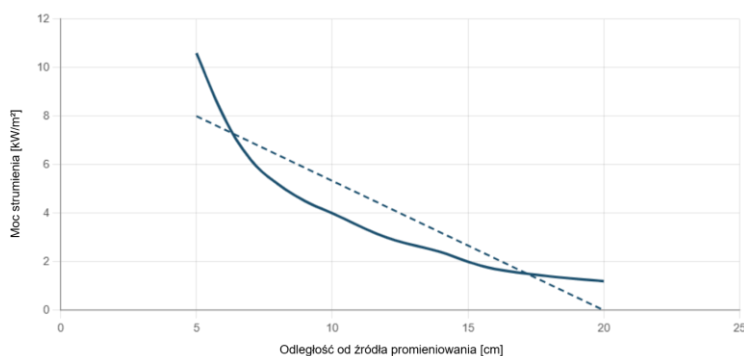
Tabela 10. Podstawowe parametry określone w trakcie pomiaru

Temperatura na powierzchni wewnętrznej materiału/ komponentów materiałów tzw. próg bólu	°C
Temperatura na powierzchni zewnętrznej próbki elementów ochron osobistych w momencie osiągnięcia kryterium	°C
Temperatura na powierzchni membrany od strony wymuszenia w momencie osiągnięcia kryterium	°C
Temperatura na powierzchni izolacji termicznej od strony wymuszenia w momencie osiągnięcia kryterium	°C
Średnia temperatura otoczenia	°C
Strumień ciepła przenikającego przez próbkę w momencie osiągnięcia kryterium	W/m ²
Czas od wymuszenia do osiągnięcia kryterium	s
Czas od wymuszenia do osiągnięcia kryterium RHTI	s
Czas ekspozycji	s
Relacja między kryterium, a RHTI	-

Źródło. Opracował dr inż. R.M. Wolański

Badania szczegółowe poszczególnych materiałów rozpoczęto od określenia parametrów charakterystycznych stanowiska, tj. moc generowaną przez promienniki w obszarze badawczym w funkcji odległości. Uzyskane charakterystyczne wartości umożliwiające dalsze badania osłabienia strumienia dla poszczególnych próbek materiału przedstawiają się następująco.

Wykres 10. Moc strumienia określona na stanowisku badawczym parametrów



Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań parametrów tkanin

Tabela 11. Wyznaczony na stanowisku badawczym jw. wykres mocy strumienia w funkcji odległości

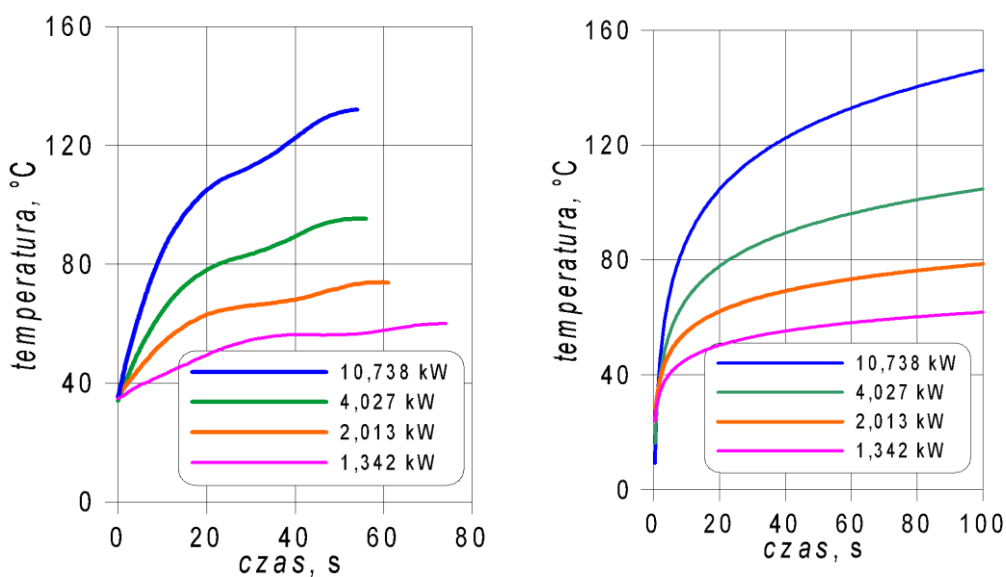
Odległość [cm]	Moc [kW/m ²]
20	1,342282
19	1,342282
18	1,342282
17	1,342282
16	1,677852
15	2,013423
14	2,348993
13	2,684564
12	3,020134
11	3,355705
10	4,026846
9	4,697987
8	5,369128
7	6,711409
6	8,724832
5	10,73826

Źródło: Opracowanie autora i dr Jana Gielżeckiego

Poniżej przedstawiono wyniki badań poszczególnych tkanin technicznych oraz uzyskane parametry osłabienia natężenia strumienia promieniowania. Wyniki zaprezentowano w postaci wykresów dla charakterystycznych odległości od promiennika: 5, 10, 15 i 20 cm.

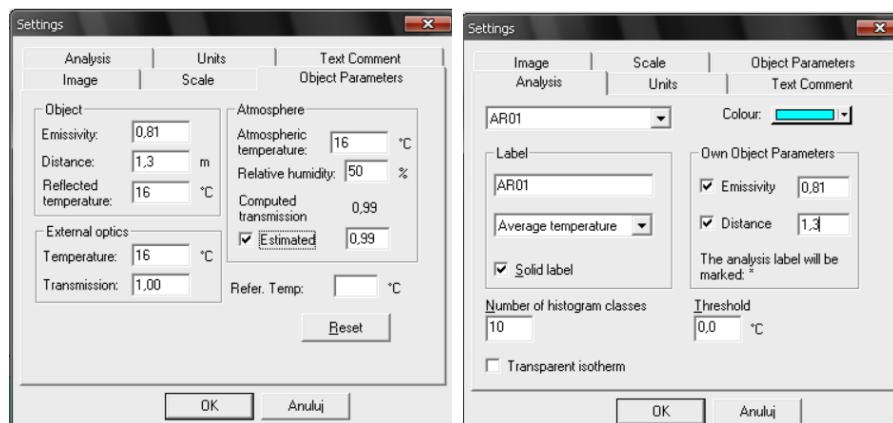
W celu weryfikacji dokładności pomiarów przeprowadzono aproksymację danych z określeniem współczynnika zbieżności (R^2) wynoszącego co najmniej 0,99.

Wykres 11. Osłabienia strumienia promieniowania Próbką 1 – Włókno szklane 530+30 z płatkami aluminium Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja
R-squared = 0. 983752

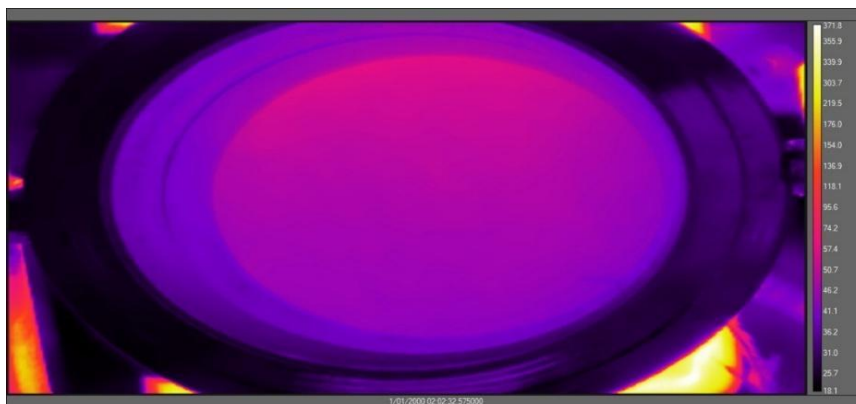


Źródło: Opracowanie autora i dr Jana Gielżeckiego

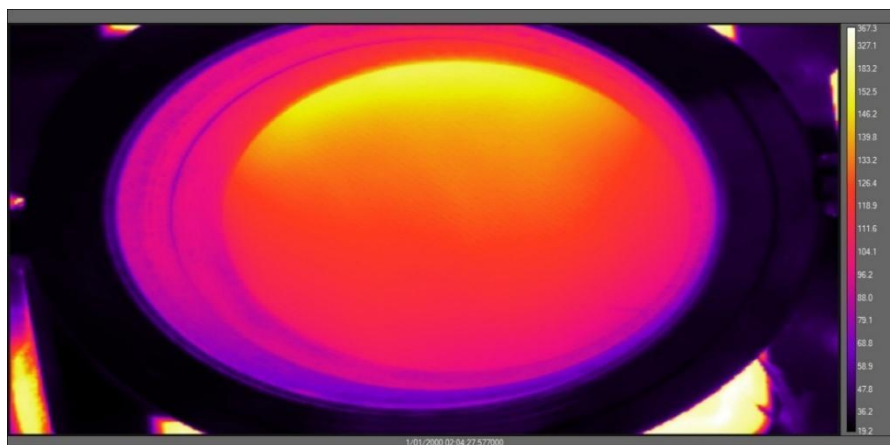
Rysunek 31. Próbką 1. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy



Rysunek 32. Próbką 1. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy

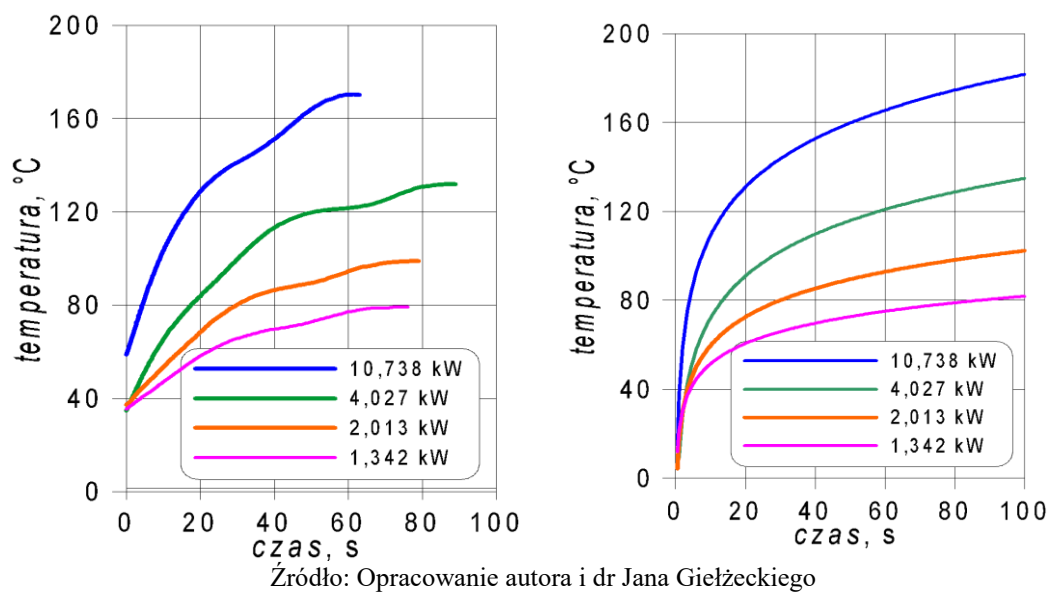


Rysunek 33. Termogram próbka 1. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony

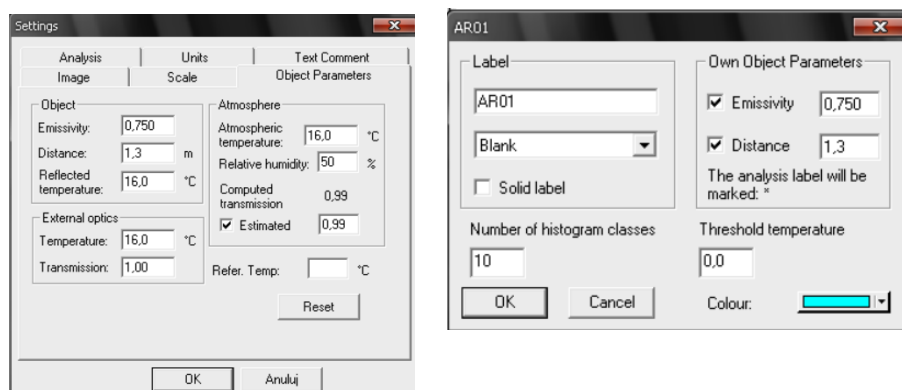


Rysunek 34. Termogram próbka 1. odległość 5 cm, czas 120 s po otwarciu przesłony

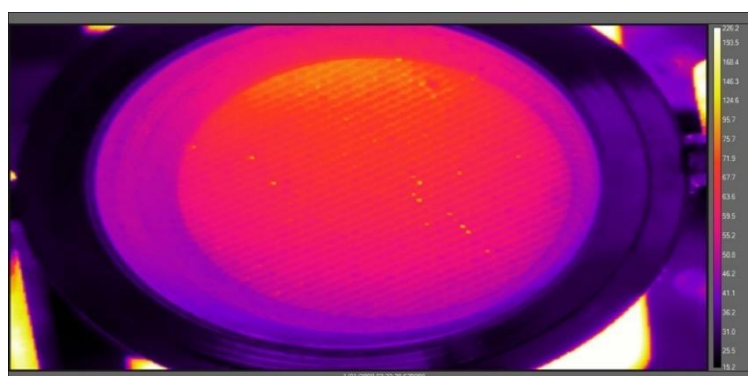
Wykres 12. Osłabienia strumienia promieniowania Próbką nr 2 włókno szklane + wermikulit
Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja R-squared = 0.968341



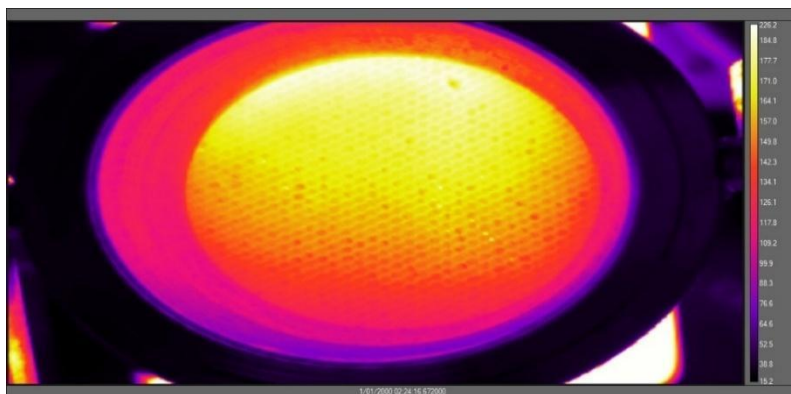
Źródło: Opracowanie autora i dr Jana Gielżeckiego



Rysunek 35. Próbką 2. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy

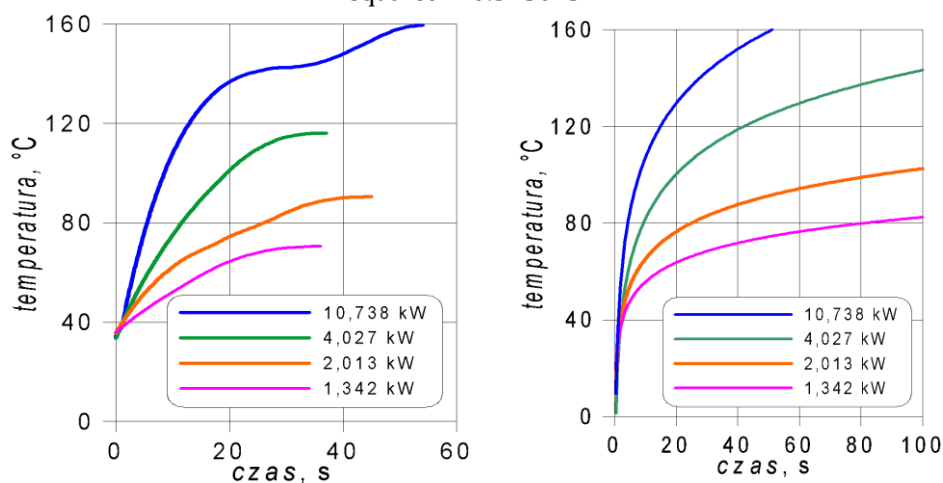


Rysunek 36. Termogram próbka 2. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony

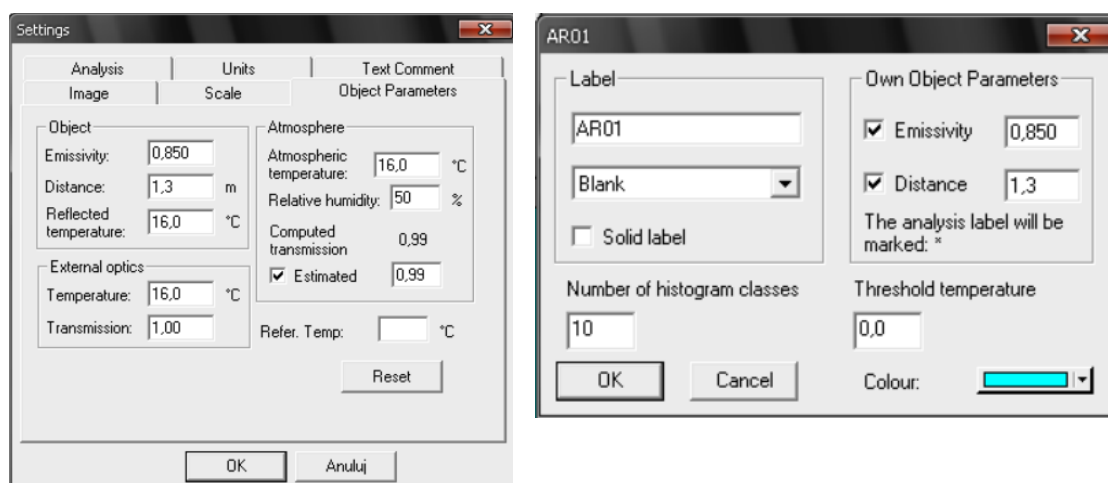


Rysunek 37. Termogram próbka 2. odległość 5 cm, czas 113 s po otwarciu przesłony

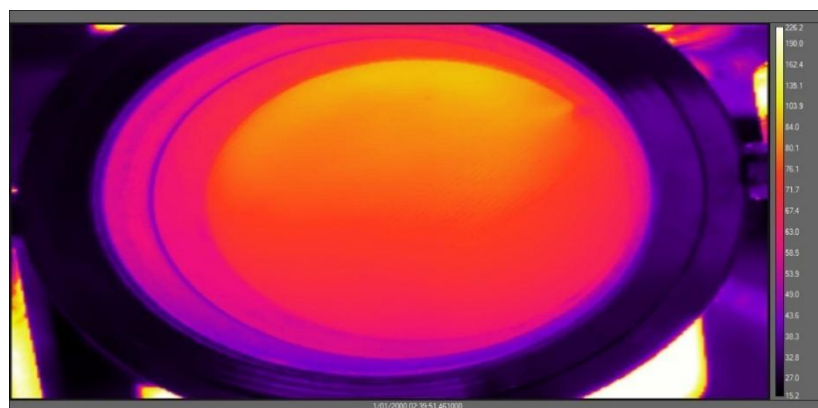
Wykres 13. Osłabienia strumienia promieniowania Próbka nr 3 włókno szklane pokryte płatkami aluminium. Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja R-squared = 0.975075



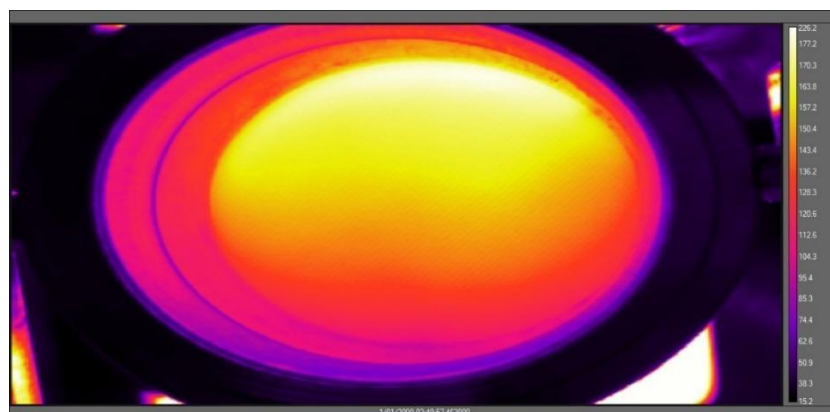
Źródło: Opracowanie autora i dr Jana Gielżeckiego



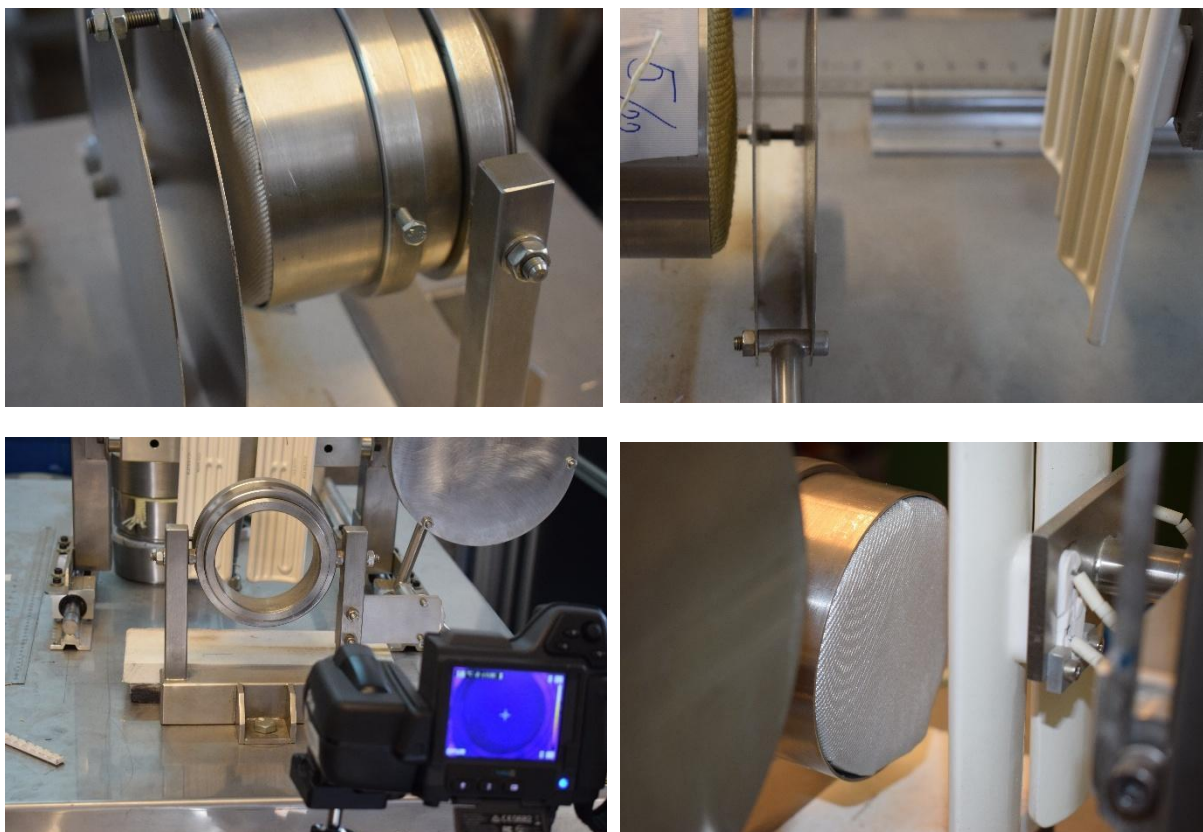
Rysunek 38. Próbka 3. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy



Rysunek 39. Termogram próbka 3. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony



Rysunek 40. Termogram próbka 3. odległość 5 cm, czas 71 s po otwarciu przesłony



Rysunek 41. Pomiar na stanowisku badawczym osłabienia strumienia promieniowania
– opracowanie własne

Sposób aplikacji tkaniny na próbkę

Tkaninę mocowano na eksponowanej powierzchni próbki drewna za pomocą płaskownika ze stali nierdzewnej, pełniącego funkcję sztywnego ogranicznika na całą wysokość próbki, z punktami kotwienia do ramy osłony termicznej. Na bocznych krawędziach próbki tkaninę dociskano klipsami ze sprężynami elastycznymi, zapewniającymi równomierne napięcie materiału i jego ścisły kontakt z powierzchnią drewna.

W celu zapewnienia prawidłowego przylegania tkaniny i minimalizacji wpływu niekontrolowanych czynników zewnętrznych na interfejsie tkanina-drewno, wymiary próbki tkaniny na stanowisku przekraczały wymiary próbki drewna: o 15 cm w kierunku poziomym i 5 cm w kierunku pionowym. Szczeliny powietrzne między tkaniną a powierzchnią drewna minimalizowano poprzez precyzyjne pozycjonowanie próbki drewna na poziomie górnej krawędzi osłony termicznej.



Rysunek 42. Mocowanie tkaniny na stanowisku badawczym: zdjęcie po lewej od strony promiennika, zdjęcie po prawej po zdementowaniu próbki

6.4. Stanowiska badawcze

Budowa stanowiska badawczego

Kluczowym założeniem konstrukcyjnym stanowiska jest możliwość badania zachowania różnych typów osłon przeciwpożarowych (tkanin technicznych, powłok, mat izolacyjnych) nakładanych jednostronnie na powierzchnię próbki drewna. Takie podejście umożliwia bezpośrednią ocenę ich skuteczności w modyfikacji kinetyki zwęglania oraz w ograniczeniu transferu ciepła do wnętrza elementu drewnianego.

Do symulacji oddziaływania promieniowania cieplnego dominującego czynnika pożarowego w początkowej fazie wykorzystano dwa promienniki podczerwieni firmy SELFA (model T-HTS 1000W, 230V każdy). Promienniki dobrane zostały tak, aby sumaryczna powierzchnia emisji odpowiadała wymiarom próbki drewna, zapewniając jednolitość pola promieniowania. Stanowisko umożliwia płynną regulację odległości promiennika od próbki, jednak w realizowanym programie badawczym odległość ta utrzymywana była na stałym poziomie 5 cm, stanowiącym referencyjne warunki dla wszystkich pomiarów.

Kontrola temperatury i symulacja przebiegu pożaru

Kontrolę temperatury realizował programowalny sterownik temperaturowy (Termipol RAMP 9s), który realizował przebieg temperatury zbliżony do standardowej krzywej celulozowej. Krzywa ta odzwierciedla rzeczywisty scenariusz pożarowy w budynkach i umożliwia porównywalność wyników z innymi badaniami. Zastosowana

konfiguracja umożliwiła jednoczesną analizę zarówno kinetyki przegrzewania próbki drewnianej, jak i dynamiki termicznej degradacji warstwy osłonowej podczas całego eksperymentu.

Mocowanie próbki i kompensacja efektów termicznych

Próbka była trwale zamocowana w uchwycie zapewniającym sztywność geometryczną i eliminującym możliwość przemieszczeń termicznych i mechanicznych, które mogłyby zniekształcić wyniki pomiarów. Wpływ rozszerzalności termicznej osprzętu montażowego uznano za pomijalny na podstawie badań przygotowawczych, które nie wykazały istotnych odkształceń w analizowanym zakresie temperatur i czasów ekspozycji. Wniosek ten uzasadniał pominięcie tego efektu w analizie wyników.

System akwizycji danych temperaturowych

Do precyzyjnego monitorowania zmian temperatury zastosowano osiem wzorcowanych termopar typu K (firmy Limatherm-Senor) o zróżnicowanych zakresach pomiarowych, z górną granicą do 1300°C. Sygnały z termopar rejestrowano za pomocą rejestratora danych APAR (model AR207), zapewniającego ciągły zapis parametrów temperatury w trakcie eksperymentu.

Rozmieszczenie czujników temperatury

Rozmieszczenie termopar zostało zaplanowane w celu rejestracji temperatury w kluczowych strefach:

- na zewnętrznej powierzchni osłony – pomiar temperatury widocznej przez kamerę termowizyjną,
- na stronie nagrzewanej próbki – na dwóch różnych wysokościach (10 i 20 cm od podstawy),
- wewnątrz masy drewna – trzy termopary o średnicy 4 mm rozmieszczone w głębi próbki.

Średnica termopar wewnątrz próbki (4 mm) została dobrana empirycznie jako optymalny kompromis między dokładnością pomiaru a minimalną ingerencją w strukturę drewna. Termopary o mniejszej średnicy uniemożliwiałyby stabilny montaż na większej głębokości, natomiast termopary o większej średnicy wymagałyby szerszych otworów montażowych, które zaburzyłyby warunki termiczne w badanej próbce.

Montaż termopar „na ciasno” (z pełnym kontaktem cieplnym) zapewniał optymalny transfer ciepła między czujnikiem a materiałem, co minimalizowało błędy pomiarowe wynikające z oporu termicznego na styku element pomiarowy - ścianka próbki.

Termopary umieszczono w odległościach 2,5 cm, 4,5 cm i 6 cm od narażonej na działanie ciepła powierzchni próbki. Termopary zamontowano na głębokości 20 cm od górnej powierzchni próbki.

Pozostałe termopary monitorowały temperaturę osłon termicznych oraz elementów konstrukcyjnych stanowiska, umożliwiając potwierdzenie pełnego wychłodzenia całego systemu przed rozpoczęciem kolejnego cyklu eksperymentalnego oraz wykluczenie wpływu rezydualnego ciepła na wyniki pomiarowe.

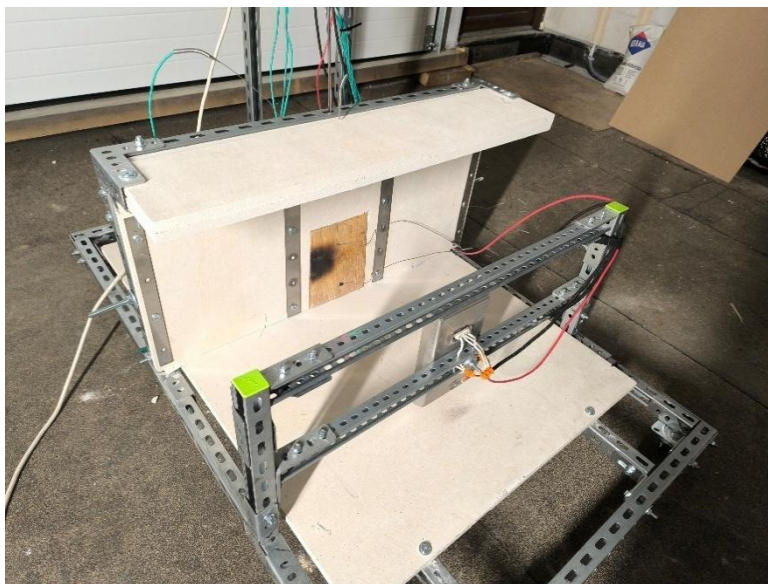
Przez cały czas trwania eksperymentu dodatkowo rejestrowano temperaturę powietrza otaczającego i wilgotność względną laboratorium na poziomie wysokości próbki. Stanowisko było dodatkowo wyposażone w system ciągłego pomiaru zmian wilgotności próbki (opcja nieaktywowana w analizowanym cyklu badawczym).

Systemy bezpieczeństwa stanowiska obejmowały: czasomierz ekspozycji, automatyczne uruchomienie wentylacji awaryjnej po przekroczeniu progowego poziomu zadymienia laboratorium oraz czujnik detekcji tlenku węgla.

Układ i rozmieszczenie termopar był konfigurowany indywidualnie i stały dla danego cyklu badawczego. Przestrzeń robocza stanowiska wyposażona została w wymienne ograniczniki umożliwiające adaptację do elementów o różnych wymiarach, a stosowane materiały osłonowe (w tym płyty stosowane w ochronie przeciwpożarowej PROMATECT typu H o gr.20 mm) charakteryzowały się wysoką trwałością, umożliwiając wykonanie około 100 cykli eksperymentalnych bez istotnych uszkodzeń wpływających na powtarzalność warunków termicznych. Konstrukcja nośna i systemy przesuwne elementów ruchomych stanowiska wykonane zostały z profili instalacyjnych modułowego systemu firmy BAKS, zapewniając sztywność i elastyczność konfiguracyjną urządzenia.

Opracowana koncepcja stanowiska stanowi rezultat wieloletniej praktyki autora w zakresie projektowania, wdrażania i oceny skuteczności zróżnicowanych rozwiązań

zabezpieczeń przeciwpożarowych, od systemów prostych i niskokosztowych po rozwiązania zaawansowane technologicznie.



Rysunek 43. Stanowisko badawcze

6.4.1 Stanowisko badawcze wariant 1 i 2

Stanowisko z promiennikiem podczerwieni zostało zaprojektowane w celu odwzorowania składowa promieniowania cieplnego charakterystycznego dla warunków pożarowych. Źródło ciepła stanowią płytowe promienniki ceramiczne IR o łącznej mocy 2000 W, rozmieszczone symetrycznie względem osi próbki w odległości 50 mm od eksponowanej powierzchni.

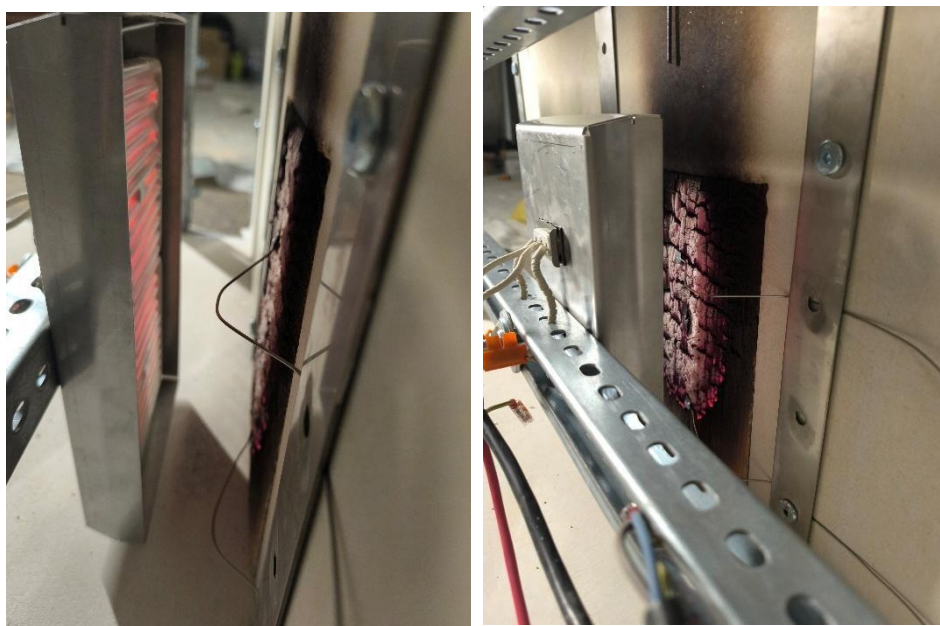
Jeden promiennik wyposażony jest w termoparę pomiarową, umożliwiającą dokładny pomiar jego temperatury powierzchni i precyzyjne sterowanie w celu uzyskania zadanej krzywej nagrzewania. Promienniki zabudowane są w osłonie ze stali nierdzewnej o grubości 2 mm w celu zminimalizowania konwekcji powietrza w bezpośrednim otoczeniu promienników i zapobieżenia zniekształceniom pomiarów temperatury powierzchni.

Proces nagrzewania promienników zainicjowany zostaje od temperatury otoczenia i prowadzony jest zgodnie z wcześniej przygotowanym algorytmem dla sterownika RAMP 9S.

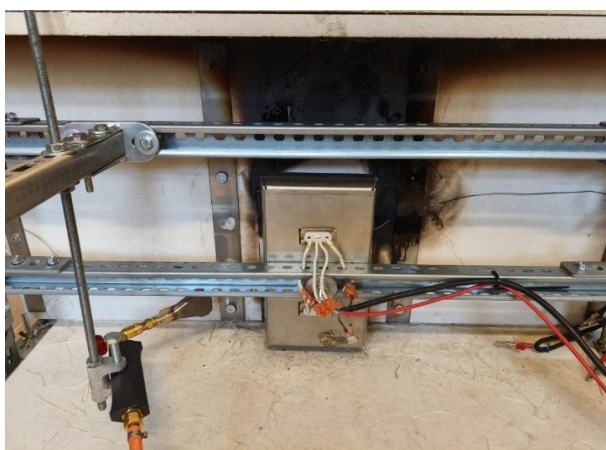
Wariant drugi stanowiska uzupełniony jest o palnik firmy Perun, zasilany mieszkanką gazową propan-butan-powietrze, dostarczany przez firmę GASPOL, o regulowanej mocy cieplnej w zakresie 8 - 20 kW. W realizowanym programie badawczym palnik pracował z pełną mocą, tj. 20 kW.

Palnik umieszczony jest na ramie podporowej z boku promienników pod kątem 45° względem osi próbki. Wysokość montażu podstawy palnika wyniosła 12 cm. Odległość między zakończeniem dyszy palnika a powierzchnią próbki wynosiła 10 cm.

Płaska konfiguracja dyszy palnika zapewnia równomierne rozrowadzenie płomienia na szerszej powierzchni materiału osłonowego i próbki, co pozwala na lepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków pożarowych, w których działanie płomienia rozpościera się na znacznie większej powierzchni niż przy punktowym źródle charakterystycznym dla konwencjonalnych badań laboratoryjnych.



Rysunek 44. Zestaw promienników w osłonie na stanowisku badawczym



Rysunek 45. Zestaw promienników i palnik gazowy (układ drugiego badania)

6.4.2 System pomiarowy — termopary i akwizycja danych

Rozkład temperatury w przekroju próbki mierzono za pomocą 8 termopar typu K. Zastosowane modele to: PTTK-TKB-30-1-SO-500-3m-Si, PTTK-TKb-30-1-SO-200-3m-Si, PTTK-TKb-15-1-SO-500-3m-Si-KU56/25 (z blaszką pomiarową $10 \times 10 \times 0,4$ mm), PTTK-TKb-15-1-SO-500-3m-Si (0,5 mm).

Dwie termopary zastosowano do pomiaru temperatury powierzchni próbki drewnianej, wyposażone zostały w blaszki pomiarowe o wymiarach $10 \times 10 \times 0,4$ mm i zamocowane na elastycznych uchwytach sprężynowych. Rozwiązanie to miało na celu zapewnienie dokładności pomiarów temperatury w trakcie progresji zwęglania, spowodowanej zmianą punktu styku termopary ze zmniejszającą się powierzchnią materiału.

Jedna termopara, przeznaczona do pomiaru temperatury osłony termicznej (od strony ekspozycji), umieszczona była na wysokości około 12 - 13 cm.

Trzy termopary monitorujące temperaturę wewnątrz próbki drewna wprowadzano od górnej powierzchni próbki, osiągając głębokość 20 cm w masie drewna. Wszystkie rozmieszczone są za osłoną termiczną od strony ekspozycji, eliminując wpływ temperatury promieniowanego z tego kierunku.

Istotnym punktem kontrolnym jest termopara monitorująca temperaturę osłony termicznej, a dokładniej proces jej schładzania do temperatury otoczenia. Na podstawie obserwacji eksperymentalnych, minimalny czas wymagany do wystudzenia osłony do temperatury około 30°C wyniósł 35 - 40 minut. Parametr ten jest ważny dla określenia minimalnego czasu pomiędzy poszczególnymi cyklami eksperymentalnymi.

Zapis danych prowadzono za pomocą wielokanałowego rejestratora danych APAR AR207 z częstotliwością próbkowania 10 sekund. Częstotliwość ta wystarczająca była do rejestracji zmian temperatury w procesie transferu ciepła w głąb materiału.

Dane rejestrowane były w pamięci rejestratora i po każdym cyklu eksperymentalnym przenoszone na komputer i analizowane w programie Microsoft Excel. Wbudowany wyświetlacz rejestratora umożliwiał bieżące monitorowanie zmian temperatury w próbce. Na wyświetlaczu przedstawiany był też zakres pomiarowy każdej termopary.

W celu weryfikacji poprawności elektronicznego zapisu danych prowadzona była równoległa dokumentacja ręczna, z notowaniem wartości temperatury co 3 minuty, Interwał czasowy zapisu ręcznego wynikające z możliwości operatora.

Przed każdą serią badawczą przeprowadzano weryfikację poprawności działania termopar. Podczas testów weryfikacyjnych przeprowadzonych dla każdej serii badawczej jedna z termopar wykazywała znaczące opóźnienie w odpowiedzi na zmiany temperatury, co prowadzić mogło do zniekształceń pomiarów, stąd też czujnik został wymieniony. Uszkodzenie to najprawdopodobniej powstało w wyniku mechanicznego obciążenia podczas wprowadzania termopary w głąb próbki drewnianej.

Tabela 12. Usytuowanie termopar na stanowisku laboratoryjnym

Nr punktu	Lokalizacja	Opis i uzasadnienie
Pkt 1	h = 10 cm (st. nagrzewana)	Temperatura powierzchni próbki drewna na wysokości 10 cm, punkt odniesienia dla profilu temperaturowego
Pkt 2	h = 20 cm (st. nagrzewana)	Temperatura powierzchni próbki drewna na wysokości 20 cm, punkt odniesienia dla profilu temperaturowego
Pkt 3	Oslona - nad próbką	Temperatura środowiska bezpośrednio powyżej okna ekspozycji - warunki otoczenia próbki
Pkt 4	Tkanina h = 15 cm	Temperatura tkaniny technicznej na wysokości 15 cm (punkt centralny ekspozycji), aktywny tylko przy zastosowaniu tkaniny
Pkt 5	2,5 cm od czoła głębokość osadzenia h=20 cm	Temperatura wewnątrz próbki - 2,5 cm od powierzchni nagrzewanej; profil termiczny w przekroju
Pkt 6	4,5 cm od czoła głębokość osadzenia h=20 cm	Temperatura wewnątrz próbki - 4,5 cm od powierzchni nagrzewanej; profil termiczny w przekroju
Pkt 7	6,0 cm od czoła głębokość osadzenia h=20 cm	Temperatura wewnątrz próbki - 6,0 cm od powierzchni nagrzewanej; profil termiczny w przekroju
Pkt 8	Strona nienagrzewana 0,5 cm	Temperatura przy powierzchni nienagrzewanej (0,5 cm od tylnej ścianki na wysokości 10 cm) — kontrola przewodzenia ciepła przez pełny przekrój

Źródło: Opracowanie własne

6.5 Procedura badawcza

6.5.1 Przygotowanie próby badawczej

Przed każdą próbą realizowano następującą sekwencję czynności przygotowawczych:

- pomiar masy próbki: waga laboratoryjna Kern model EWJ 6000-2 (dokładność $\pm 0,01$ g). Próbki kwalifikowane do badań musiały wykazywać masę w zakresie 1410 - 1460 g,



Rysunek 46. Pomiar masy próbki

- pomiar wilgotności: pomiary wykonywane w trzech punktach (ściana ekspozycji, dolna i górna krawędź próbki) za pomocą miernika UNIT. Zakres wilgotności akceptowany do badań: 12 - 14%,
- pomiar wymiarów geometrycznych: suwmiarka z zakresem do 300 mm (dokładność 0,02 mm). Próbki kwalifikowane do badań musiały wykazywać wymiary $80 \times 160 \times 250$ mm z tolerancją ± 4 mm,
- umieszczanie czujników we wstępnie przygotowanych otworach montażowych. Otwory montażowe wiercone były na wiertarce stacjonarnej pionowej przy użyciu szablonu pozycjonującego, zapewniającego precyzyjne rozmieszczenie termopar w określonej głębokości i lokalizacji poziomej.

Ewentualne szczeliny wynikające z tolerancji wymiarowych próbki uszczelniane były masą spęczniającą FlameCable Pasta A aplikowaną ręcznym pistoletem. W celu minimalizacji ilości materiału spęczniającego na stronie nieeksponowanej próbki zgodnie z potrzebami stosowano paski materiału żaroodpornego firmy Vitcast.

Procedura montażu tkaniny była wieloetapowa, zapewniająca prawidłowe rozmieszczenie i napięcie materiału osłonowego. Na jednej stronie próbki tkanina dociskana była sztywnym płaskownikiem ze stali nierdzewnej na całej wysokości. Na drugim boku tkanina dociskana była elastycznymi klipsami ze sprężynami, zapewniającymi równomierne napięcie i eliminującymi szczeliny powietrzne, które mogłyby zniekształcić pomiary.

Po aplikacji tkaniny próbka drewna montowana była na stanowisku. Procedura ta zapewniała powtarzalność warunków montażu między poszczególnymi cyklami.

6. Pozycjonowanie próbki na stanowisku, podłączenie do rejestratora. Zapis parametrów środowiskowych: temperatura w laboratorium, wilgotność względna. Czas oczekiwania na stabilizację odczytów termopar: około 2 - 3 minuty.

6.5.2 Przebieg ekspozycji termicznej

Czas ekspozycji próbki na działanie czynników termicznych ustalono na 30 minut dla obu wariantów stanowiska. W wariantcie drugim (ze źródłem płomienia) palnik zainicjowany był po czasie 20 minut ekspozycji i osiągał pełną moc (20 kW) w 21 minucie. Sekwencja ta wynikała z procedury notowania ręcznego danych oraz konieczności stabilizacji systemu zasilającego palnik.

Po upływie 30 minut ekspozycji źródła ciepła wyłączane były: promienniki wyłączane automatycznie poprzez sterownik, palnik gaszony ręcznie poprzez zamknięcie zaworu na rękojeści urządzenia.

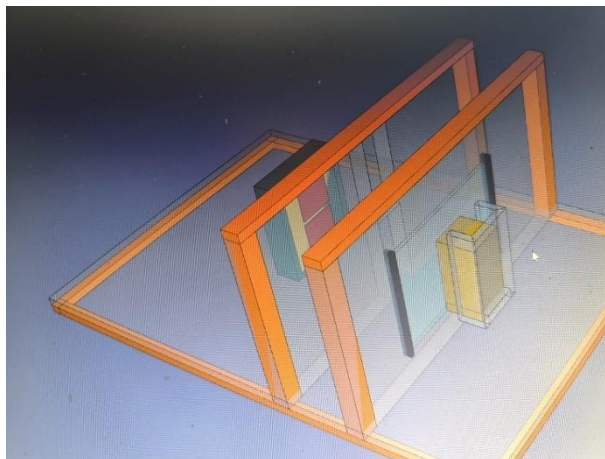
Po wyłączeniu źródeł ciepła zespół promienników i palnika odsuwany był na odległości 50 cm od próbki. Próbka niezwłocznie wyciągana była ze stanowiska i następnie poddawana procedurze gaszenia za pomocą mgły wodnej (ok. 0,5 l wody dla każdej próbki). Po gaszeniu próbkę pozostawiano w pozycji ekspozycji, aby wystudzić się do temperatury otoczenia laboratorium. Podczas naturalnego studzenia próbki demontowana była tkanina techniczna ze stanowiska, co umożliwiało dostęp do próbki dla dalszych pomiarów.

W trakcie prowadzonych badań cykl badawczy przzerwano 8 razy. Główne powody to przerwa w dostawie energii elektrycznej, co zostało w późniejszym etapie wyeliminowane przez zastosowanie podtrzymania awaryjnego UPS na czas ok. 5 min, poluzowania się tkaniny badanej, a w jednym przypadku użycie zbyt dużej ilości materiału pęczniejącego wypełniającego nieszczelności spowodował przemieszczenie próbki w znaczący sposób, zwiększając szczelinę powietrzną, co w konsekwencji wpłynęło na głębokość zwęglenia. Przerwane cykle badawcze nie są uwzględniane w grupie badawczej poddanej dalszej analizie.

Przed rozpoczęciem cyklu badawczego wykonano ok. 10 prób w pełnym zakresie dla próbek świadek oraz wybranych tkanin w celu weryfikacji poprawności założeń oraz po wprowadzeniu poprawek konstrukcyjnych w stanowisku.

Po wstępnych próbach wprowadzono poprawki i modyfikacje wpływające na powtarzalność końcowych badań. Zwiększono wymiar próbki materiału badanego na stanowisku w celu wyeliminowania braku dolegania do osłony termicznej spowodowanego bliskością uchwytów sprężynujących. Po zmianie usunięto ten problem. Kolejna istotna zmiana to wymiana dwóch termopar mierzących temperaturę na powierzchni próbki drewna. Pierwotnie zastosowane termopary z elastycznym elementem termoczułym zagięte w kierunku drewna powodowały odpychanie materiału i lokalne powstawanie szczeliny powietrznej. Przy próbkach typu świadek cienki element pomiarowy w końcowych etapach badania nie dolegał do materiału lub znajdował się między pęknięciami w zwęglonej części. Ten problem został wyeliminowany przez zastosowanie termopar z poszerzeniem na końcach, co pozwalało na niezaginanie końca termopar, lepsze przyleganie, brak zagłębiania termopary w pęknięciach. Wprowadzenie uchwytu sprężynującego na granicy osłony termicznej i części sztywnej termopary poprawiło docisk w całym okresie badania. Kolejny element, który podlegał modyfikacji to zmiana organizacyjna związana z koniecznością usuwania nagromadzonych substancji smolistych z osłon termicznych średnio co 15 prób. Było to spowodowane zapaleniem nagromadzonych osadów i zafałszowaniem wyników. Po wprowadzeniu czyszczenia – zeskrobania warstwy z osłon, problem został wyeliminowany. Ważną modyfikacją, która została wprowadzona w czasie testów, była zmiana w zakresie uruchomienia wentylacji awaryjnej w laboratorium spowodowana zbyt dużym zadymieniem. Stanowisko badawcze ustawione zostało bezpośrednio pod układem wyciągowym, który w czasie testów pracował w trybie grawitacyjnym. W pierwszych próbach pod koniec cyklu badawczego System Sygnalizacji Pożaru uruchamiał wentylator wyciągowy, który w znaczący sposób powodował zawirowanie mas powietrza i zmiany temperatury na powierzchni badanej. Po zmianie założeń bezpieczeństwa uruchomienie systemu sygnalizacji pożaru było sygnalizowane na centrali alarmowej. Skutkowało to koniecznością użycia sprzętu ochrony dróg oddechowych przez operatora stanowiska, a uruchomienie wentylacji wyciągowej było powiązane z zakończeniem cyklu badawczego (wyłączenie sterownika). Ostatnią zmianą organizacyjną wprowadzoną, a już wspomnianą wcześniej, było przesunięcie czasu uruchomienia palnika na 21 minutę ze wstępnie określonej 20 min badania. Spowodowane było to założeniami dodatkowego zapisu pomiarów w wersji papierowej jako zabezpieczenie utraty danych i weryfikacji odczytów automatycznych z tymi wyświetlanymi na wizualizacji rejestratora AR207. Przesunięcie uruchomienia palnika o 1 minutę umożliwiło zapewnienie powtarzalności

czasu uruchomienia pracy palnika, co w próbach wstępnych przysparzało dużo problemów. Zmiana ta związana była z założeniami, że cały proces badawczy przeprowadzał jednoosobowo autor pracy.



Rysunek 47. Pierwsze testy stanowiska i założenia koncepcyjne

6.5.3 Procedura po próbie

Po wystudzeniu próbki i całkowitym odparowaniu wody stosowanej do gaszenia i schładzania (co najmniej 3 - 4 dni) przeprowadzano analizę próbki:

- obserwacja wizualna i ocena uszkodzeń materiału: obserwacja wizualna i ocena uszkodzeń materiału w postaci pęknięć, rozwarstwiania się oraz innych deformacji ujawniających się dopiero podczas ekspozycji termicznej i niewidocznych podczas wstępnej kontroli.
- pomiar głębokości strefy zwęglenia: pomiar głębokości strefy zwęglenia wykonywany był w czterech punktach rozmieszczonych symetrycznie w centralnym obszarze zwęglonej warstwy, zapewniając powtarzalność między próbkami.
- weryfikacja rozmieszczenia termopar: w celu weryfikacji poprawności pomiaru głębokości zwęglenia oraz kontroli prawidłowości rozmieszczenia termopar każda próbka poddawana była przecięciu wzdłużnemu. Obserwacja przekrojów nie wykazała żadnych rozbieżności w rozmieszczeniu termopar, potwierdzając prawidłowość procedury montażu.
- ograniczenie zakresu pomiaru do obszaru pełnego zwęglenia: pomiary głębokości zwęglenia ograniczane były wyłącznie do obszaru pełnego zwęglenia, pomijając strefę

przejściową, w której widoczne są jedynie zmiany zabarwienia, zgodnie z zakresem planu badawczego.

- ocena degradacji materiału osłonowego: dodatkowo, dla próbek z zastosowanym materiałem osłonowym, przeprowadzana była ocena poziomu degradacji materiału osłonowego.

Procedura selekcji próbek do analizy końcowej

Każda seria eksperymentalna obejmowała 15 próbek poddanych analizie uszkodzeń przed przystąpieniem do pomiaru głębokości zwęglenia. Z każdej serii odrzucano 2 - 3 próbki wykazujące największe rozrzuty w wartościach głębokości zwęglenia. Przyczyny odrzuceń obejmowały ujawnienie wewnętrznych sęków niewidocznych podczas wstępnej kontroli lub znaczący wpływ położenia rdzenia drewna w bezpośredniej bliskości powierzchni badanej.

Obliczenie wyników

Ostatecznym rezultatem analizy było obliczenie średniej wartości głębokości zwęglenia dla 12 - 13 próbek każdej serii. Analizy przeprowadzane były oddzielnie dla wariantu z promiennikami i wariantu z promiennikami oraz palnikiem.

6.6 Podsumowanie metodyki

Opracowana metodyka badawcza integruje konwencjonalne podejście, wykorzystujące tradycyjne narzędzia pomiarowe (suwmiarkę, wagę laboratoryjną), z nowoczesnymi technologiami, takimi jak cyfrowy zapis danych i programowalny przebieg temperatury nagrzewania.

Przyjęta strategia obejmuje wstępną weryfikację próbek, kontrolę przebiegu eksperymentu oraz wielopłaszczyznową analizę zmian, co dostarcza istotnego materiału do sformułowania wniosków badawczych.

Kluczowe cechy opracowanej metodyki obejmują:

- kontrolowane warunki ekspozycji umożliwiające porównanie wpływu różnych mechanizmów wymiany ciepła,
- ciągły monitoring rozkładu temperatury w przekroju próbki,
- pomiary głębokości zwęglania weryfikowane poprzez losową analizę przekrojów próbek,

- wystarczająca liczba replikacji dla każdego wariantu badawczego (12 - 13 próbek na serię), zapewniająca statystyczną wiarygodność wyników,
- wielopłaszczyznowa analiza zmian, obejmująca zarówno uszkodzenia próbki drewnianej, jak i degradację materiału osłonowego.

Wyniki uzyskane zgodnie z opisaną metodyką będą szczegółowo przedstawione w następnym rozdziale, z podziałem na poszczególne warianty badawcze.

ROZDZIAŁ 7. BADANIA LABORATORYJNE WŁAŚCIWE - OCENA SKUTECZNOŚCI OSŁONY Z TKANIN TECHNICZNYCH

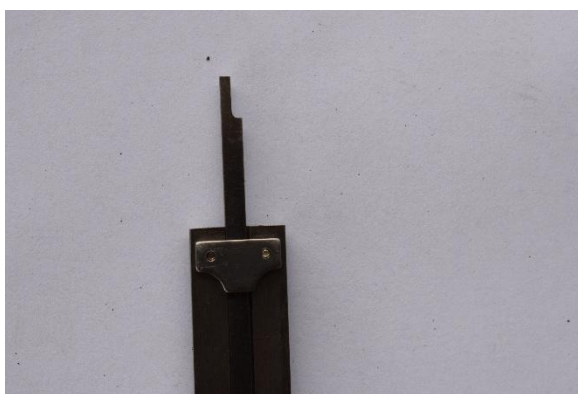
7.1 Wyniki badań na stanowisku z zestawem promienników

Przeprowadzone badania na stanowisku z zestawem promienników umożliwiły zgromadzenie bogatego materiału danych w postaci cyfrowych zapisów temperatur z termopar, umożliwiając porównawczą analizę wyników między próbkami oraz grupami badawczymi.

Niniejszy rozdział zawiera syntetyczną prezentację uzyskanych wyników, z podziałem na poszczególne warianty badawcze, uwzględniając typ materiału osłonowego, poczynsz od próbek referencyjnych (bez materiału osłonowego). Rozdział zawiera dokumentację fotograficzną wybranych próbek z każdej serii badawczej.

Metodyka pomiaru głębokości zwęglenia

Pomiary głębokości zwęglenia wykonywane były przy użyciu przygotowanego głębokościomierza (stanowiącego zakończenie suwmiarki). Element pomiarowy wtykany w zwęgloną warstwę miał wymiary $2 \times 1,5$ mm i zaokrąglone (tępe) zakończenie. Prowadnice boczne opierały się o przygotowany szablon pomiarowy, zapewniając pionowe wciśnięcie elementu. Pomiar wykonywany był poprzez wciśnięcie elementu do oporu (całkowitej penetracji strefy zwęglenia) i odczytanie głębokości na skali suwmiarki.



Rysunek 48. Zakończenie suwmiarki wykorzystanej do pomiaru głębokości zwęglenia

W celu zapewnienia powtarzalności pomiarów głębokości zwęglenia opracowano szablon pomiarowy, zapewniający precyzyjne rozmieszczenie punktów pomiarowych dla wszystkich próbek w ramach serii badawczej.

Szablon ten, odwzorowujący rzeczywiste wymiary próbki, umożliwiał precyzyjne pomiary głębokości strefy zwęglenia, tzn. warstwy całkowicie zniszczonej przez warunki termiczne na stanowisku badawczym.

Grubość szablonu wyniosła 2 mm, parametr ten uwzględniany był w obliczeniach głębokości zwęglenia poprzez odjęcie jego wartości od łącznej głębokości penetracji.



Rysunek 49. Pomiar głębokości zwęglania z wykorzystaniem szablonu

7.1.1 Próbką – świadek

W celu określenia wpływu na głębokość zwęglania materiałów osłonowych w postaci tkanin technicznych na bazie włókna szklanego wykonano badania na próbce bez osłony poddanej tylko działaniu promienników. W odróżnieniu od prób z materiałami osłonowymi przy badaniu próbek typu „świadek” w ośmiu próbkach zakwalifikowanych nastąpiło spalanie płomieniowe, które wystąpiło między 26 - 30 min badania.



Rysunek 50. Próbką świadek - widok na strony ekspozycji i profil boczny



Rysunek 51. Próbką świadek widok na strony ekspozycji i profil boczny

W próbkach referencyjnych (bez materiału osłonowego), podczas analizy uszkodzeń, w porównaniu z próbkami zabezpieczonymi, wyraźnie widoczne były pęknięcia o charakterze promieniowym oraz liczne pęknięcia w strefie przejściowej (bez pełnego zwęglenia). Uszkodzenia rozprzestrzeniały się na całej powierzchni ekspozycji, z zauważalną zmiennością zakresu. Największe uszkodzenia skoncentrowane były w górnej części próbki (powyżej 15 cm od podstawy).

Pomiary głębokości zwęglenia w grupie próbek referencyjnych wykazały wartości zawarte w przedziale 18 - 20,5 mm. Zakresy min-max podawane są w celu ukazania zmienności wyników między próbkami. Dla porównań między grupami badawczymi będzie wykorzystywana wartość średnia.

Podczas badań serii referencyjnej obserwowano wyciek żywicy i jej zapalenie się płomieniowe, powodujące lokalne zmiany w głębokości zwęglenia.

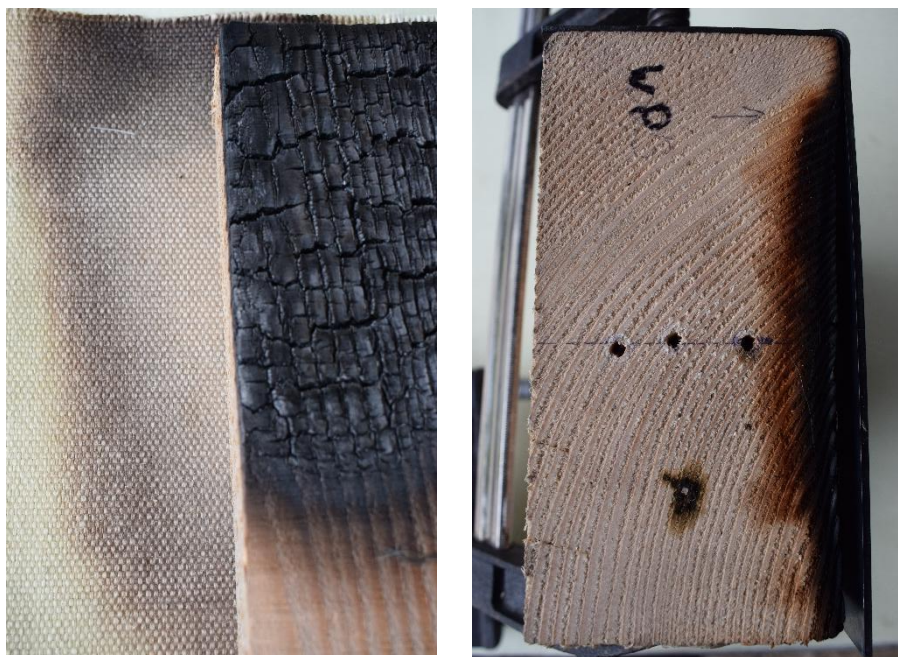
7.1.2 Próbka – tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem

Seria badawcza z materiałem osłonowym – tkaniną szklaną z wermikulitową powłoką wykazała stabilny przebieg eksperymentów. Nie obserwowano zapalenia płomieniowego między materiałem osłonowym a osłoną termiczną stanowiska.

Obserwacja dokumentowana na fotografii poniżej jest reprezentatywna dla wszystkich próbek z tej serii. Zwęglenie drewna rozpoczynało się od wysokości około 6 - 7 cm, co stanowiło wyraźną różnicę w porównaniu z próbkami referencyjnymi, gdzie zwęglenie inicjowało się od podstawy próbki.

Obserwowano ograniczone występowanie pęknięć promieniowych, a zwęglanie przebiegało równomiernie we wszystkich próbkach serii.

Przy osłonie z wermikulitu bardzo dobrze widoczne poszczególne warstwy degradowane w procesie zwęglania. Materiał osłonowy zachował ciągłość we wszystkich próbkach, widoczne przebarwienie na całej powierzchni przylegania do próbki. Na krawędziach próbka - osłona termiczna stanowiska widoczne nagromadzenie produktów smolistych w strukturze materiału. Jednak mimo takich nagromadzeń w większości próbek nie nastąpiło zapalenie substancji smolistych. Osłona po zdemontowaniu zachowała pierwotny układ włókien i splot. Tkanina przy złożeniu na pół zachowuje ciągłość, brak wykruszania materiału czy innych widocznych uszkodzeń



Rysunek 52. Próbką powłoka z wermikulitem - widok od strony ekspozycji
i widok od góry



Rysunek 53. Powłoka z włókna szklanego z modyfikacją wermikulitem po próbach na
stanowisku z promiennikami

Pomiary głębokości strefy zwęglenia dla próbek z opisywanym materiałem osłonowym znajdują się w przedziale 7,2 – 9,25 mm. Dodatkowo obserwowano brak widocznych uszkodzeń w dolnej części próbki, w tym przebarwień i nalotów sadzy charakterystycznych dla bezpośredniej ekspozycji na płomień.

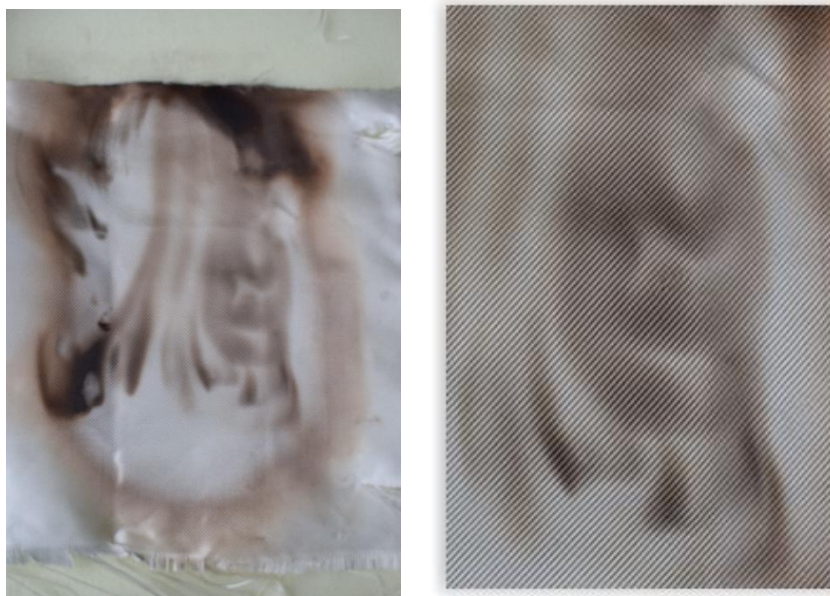
7.1.3 Próbką – tkanina szklana ECTS gramatura 530 g/m²

Próby z wykorzystaniem tkaniny szklanej surowej ECTS o gramaturze 530 g/m² wykazywały uszkodzenia od wysokości ok 4-5 cm od podstawy próbki, więc niżej niż powłoka wermikulitowa. Przebarwienia sięgają praktycznie do podstawy próbki, jednak widoczne zwęglenie rozpoczyna się zazwyczaj dla tej próby od ok 7 cm.



Rysunek 54. Próbką powłoka ECTS 530 - widok od strony ekspozycji i widok od góry

Materiał osłonowy zachował ciągłość strukturalną. Materiał zachował elastyczność nawet po ekspozycji – przy próbie zginania powracał do pierwotnego kształtu. Jednak w porównaniu z próbkami z wermikulitem, materiał ten w większości przypadków wykazał intensywne pochłanianie dużych ilości produktów smolistych (żywica i jej produkty rozkładu). Testowany materiał osłonowy charakteryzował się najcieńszą grubością i najdelikatniejszą strukturą spośród badanych wariantów. Dokumentacja fotograficzna ilustruje stany materiału po ekspozycji. Widoczne na zdjęciach osmalenia i przebarwienia materiału osłonowego mogą wskazywać na procesy spalania zachodzące w bezpośredniej bliskości materiału. Na powstanie takich śladów może mieć też wpływ niewielkie uplastycznienie materiału w trakcie próby i powstanie szczeliny powietrznej, która w tym konkretnym przypadku umożliwiła spalanie płomieniowe w tej przestrzeni. Natomiast spalanie płomieniowe zostało zaobserwowane dla dwóch próbek powyżej górnej linii osłony z włókna szklanego. Zmierzone głębokości zwęglenia dla tego materiału i serii badawczej wynoszą odpowiednio. 8,2 - 10,45 mm.



Rysunek 55. Powłoka z włókna szklanego 530 g/m² po próbach na stanowisku z promiennikami

7.1.4 Próbką – tkanina szklana tzw. kocówka

Wykonane próby z materiałem osłonowym typu tkanina szklana o gramaturze 560 g/m² wykazują zbliżony zakres uszkodzeń termicznych jak w materiale opisanym wcześniej, jednak powierzchnia zwęglona rozpoczyna się ok 2 - 3 wyżej niż dla włókna 530 g/m². Powierzchnia uległa równomiernemu zwęgleniu, brak lokalnych zmian głębokości zwęglenia. Na widoku od góry dobrze widoczne też zmiany przebarwienia poszczególnych warstw uszkodzonych przez podwyższoną temperaturę. Materiał osłonowy po badaniu nie nosi śladów uszkodzeń typu przerwanie ciągłości, lokalne zmiany struktury włókien. Podobnie jak materiał wcześniejszy widoczne przebarwienia w postaci substancji smolistych głównie w górnych częściach osłon. Jednak po analizie wszystkich osłon tego typu nie ujawniono śladów spalania płomieniowego jak w osłonie poprzedniej. Brak też uszkodzeń przy mechaniczny zginaniu czy załamywaniu materiału. Nie zmienił się też problem techniczny, którym jest bardzo duże „szczepienie”, rozwarstwianie poszczególnych elementów splotu włókien. Jednak nie wpłynęło to na skuteczność osłony, powodowało tylko utrudnienie w montażu na stanowisku badawczym, konieczność dodatkowych zabiegów jak odcinanie szczepiących się części materiału.



Rysunek 56. Próbką powłoka tzw. kocówka gramatura 560 g/m²
profil boczny i widok od góry

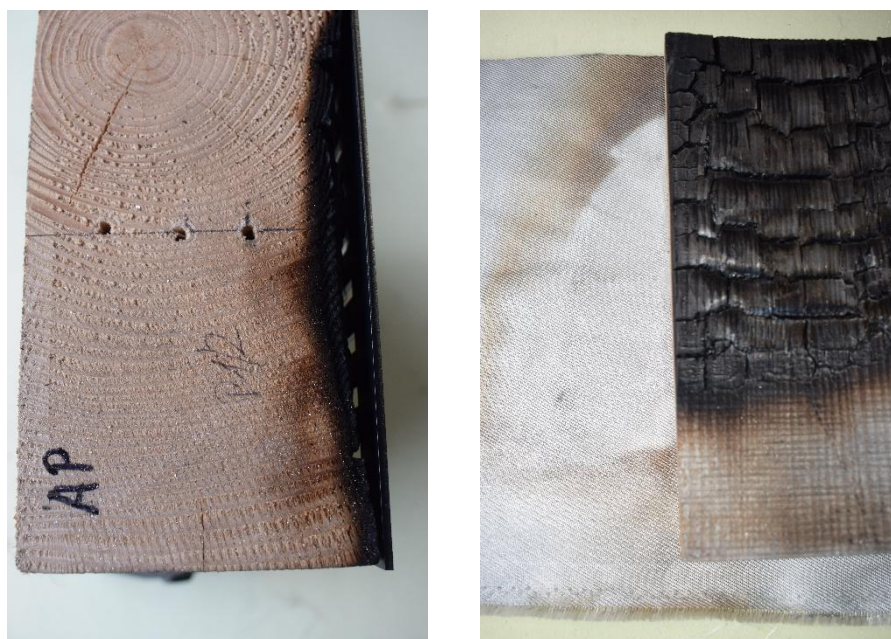


Rysunek 57. Powłoka z tkaniny szklanej 560 g/m² po próbach
na stanowisku z promiennikami oraz widoczne szczepienie materiału jako utrudnienie
eksploatacyjne

7.1.5 Próbką – tkanina szklana modyfikowana płatkami aluminium

Seria badawcza z materiałem osłonowym tkaniną szklaną o gramaturze 560 g/m² wykazała zbliżony zakres uszkodzeń termicznych w porównaniu z materiałem o gramaturze 530 g/m². Jednak inicjacja strefy zwęglenia przesunięta była wyżej około 2 - 3 cm w stosunku do wariantu o gramaturze 530 g/m².

Powierzchnia eksponowana wykazała równomierne zwęglenie, z brakiem zauważalnych lokalnych zmian w głębokości strefy zwęglenia między poszczególnymi próbkami.



Rysunek 58. Próbką powłoka modyfikowana aluminium, strona ekspozycji i widok od góry

Materiał osłonowy wykazywał minimalne przebarwienia i niewielką ilość produktów smolistych, obserwowaną na obu powierzchniach materiału. Po zdemontowaniu ze stanowiska materiał zachował strukturalną sztywność, jednak powłoka aluminiowa wykazywała łuszczenie się i kruszenie przy mechanicznym obciążeniu. W dwóch przypadkach obserwowano lokalne pęknięcia materiału po zginaniu. Uszkodzenia tego typu nie obserwowano podczas samej ekspozycji termicznej.

Materiał nie wykazywał rozwarstwiania się warstw ani rozsypywania poszczególnych włókien, obserwowanego w innych wariantach materiałów osłonowych, w tym w materiale wermikulitowym. Mimo obserwowanych zmian, materiał zachował strukturalną ciągłość przez całą ekspozycję, jednak widoczne były lokalne zmiany strukturalne powłoki aluminiowej w obszarach bezpośredniego działania promienników.

W porównaniu z innymi materiałami osłonowymi, ograniczona przepuszczalność dla gazów i wilgoci wynikała z intensywnego nagromadzenia produktów smolistych i czasowo zwiększonej intensywności dymu uwalnianego się ponad osłoną. Zjawiska tego nie obserwowano w innych wariantach materiałów osłonowych ani w próbkach referencyjnych.



Rysunek 59. Powłoka z modyfikacją płatkami aluminium jednostronnie na stanowisku z promiennikami oraz widoczne wykruszenie lokalne powłoki po badaniu

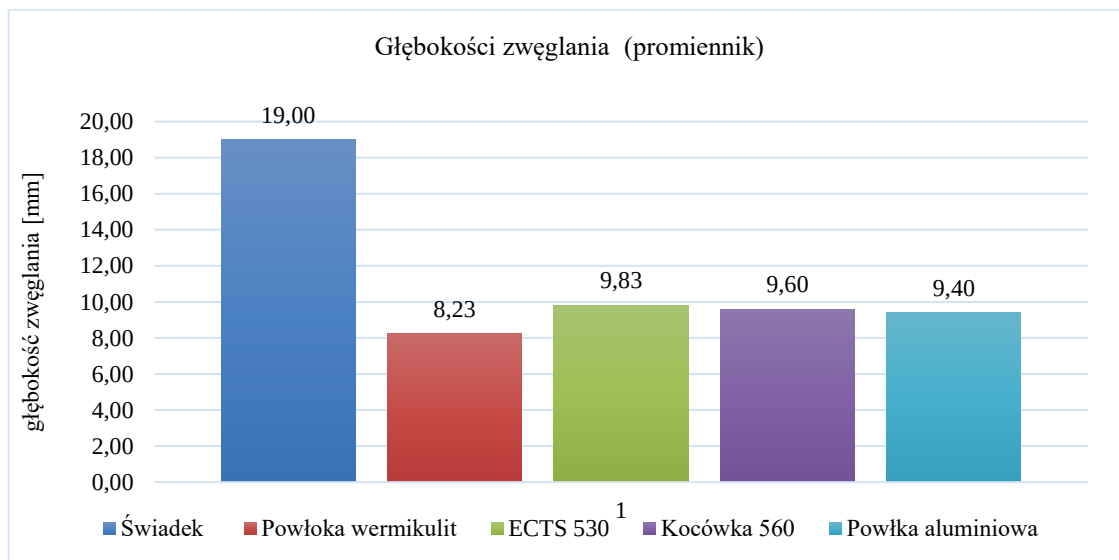
Uzyskane w tej serii badań głębokości zwęglania zawierają się w przedziale 7,8 - 11 mm. Znaczna różnica w głębokości zwęglania może wynikać z różnic w gęstości materiału, które zostały stwierdzone w czasie porównywania wyników dla tej serii badawczej. Próbki użyte w tej serii posiadały minimalną i maksymalną gęstość dla grupy dopuszczonej do badań w ramach procedury badawczej.

7.1.6 Porównanie wyników z badania laboratoryjnego z wykorzystaniem promienników

Przedstawione poszczególne wyniki głębokości zwęglania oraz poszczególnych cech uszkodzeń próbki drewna i osłony wskazują na pozytywny wpływ na zmniejszenie szybkości zwęglania. Opisane powyżej poszczególne próby wskazują na dodatnie i ujemne cechy, które ujawniają się czy to na etapie przygotowania osłony lub już w procesie badawczym. Opisane różnice oraz zmiany są następstwem analizy zgodnie z opracowaną procedurą badawczą.

Poniżej przedstawiono zestawienie danych pomiarowych z termopar prezentujące rozkład temperatur oraz wpływ osłon w rzeczywistych warunkach na osłabienie strumienia promieniowania oraz wpływ na przegrzewanie w głąb materiału,

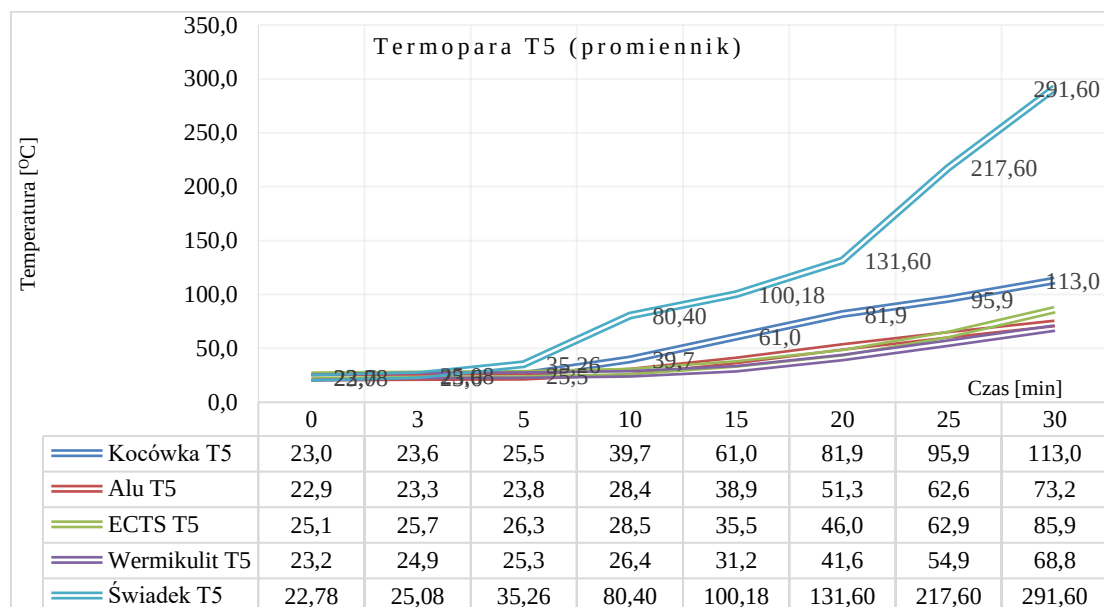
Wykres 14. Głębokość zwęglania próbki: świadek oraz przy zastawianiu poszczególnych materiałów osłonowych



Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych testów laboratoryjnych

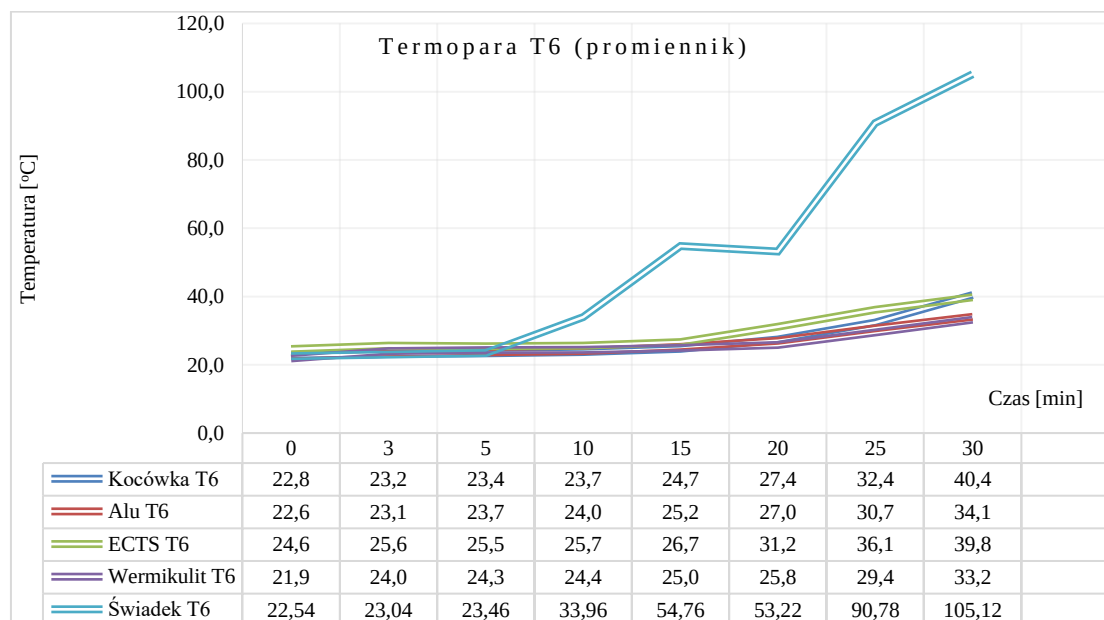
Na wykresach możemy zaobserwować wpływ zastosowania osłon na obniżenie temperatury za osłoną tekstylną, co wpływa bezpośrednio na zmniejszenie szybkości zwęglania.

Wykres 15. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 25 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



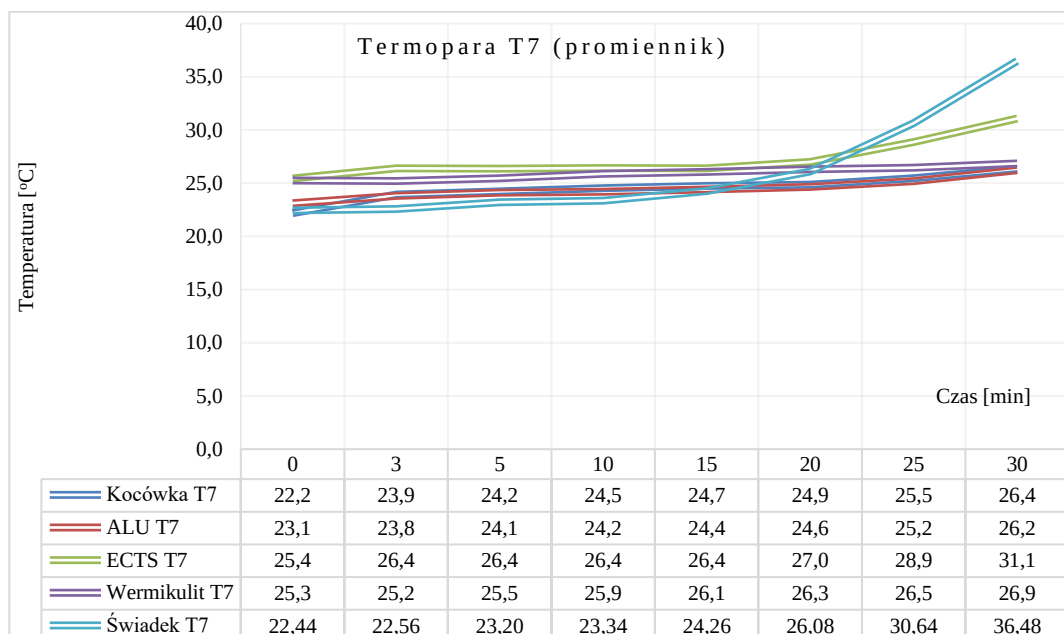
Źródło: opracowanie własne

Wykres 16. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 45 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



Źródło: Opracowanie własne

Wykres 17. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 60 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



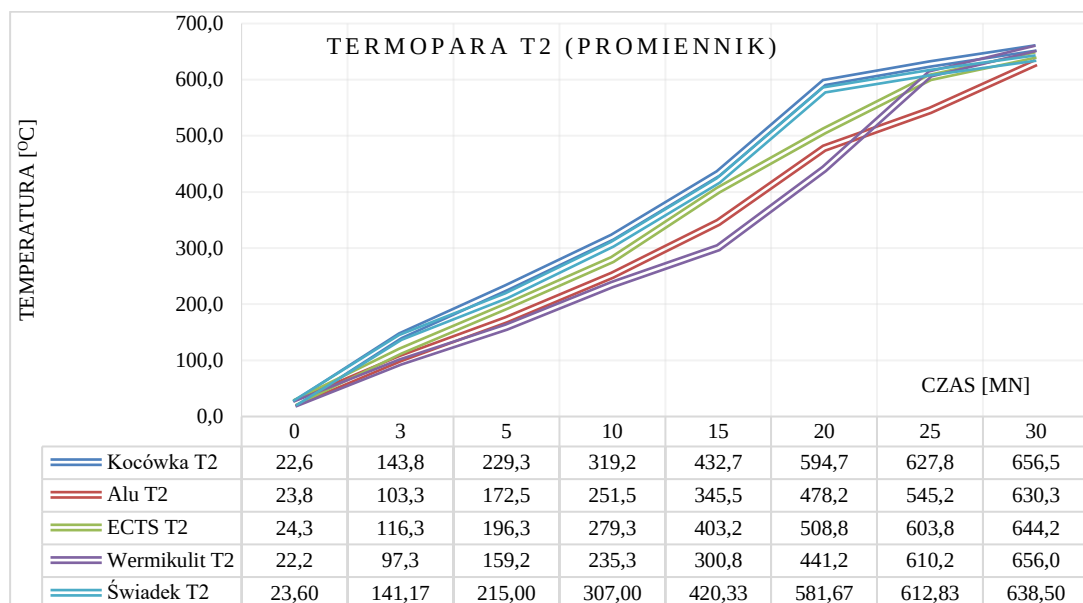
Źródło: Opracowanie własne

Wpływ zastosowania tkanin technicznych można ocenić na podstawie pomiarów temperaturowych, które mają szczególne znaczenie dla fazy inicjacyjnej zwęglania drewna.

Temperatura zmierzona w pierwszej linii pomiarowej (termopara na powierzchni drewna) w próbce referencyjnej w porównaniu z próbką chronioną powłoką aluminiową wykazywała różnicę ponad 200°C. Różnica ta nie utrzymywała się na całym przebiegu ekspozycji. Jednak wczesna faza ekspozycji, w której obserwowano maksymalną różnicę temperaturową, była szczególnie istotna dla założeń badawczych, ponieważ materiały oceniane były jako tymczasowa ochrona bierna w początkowych fazach pożaru.

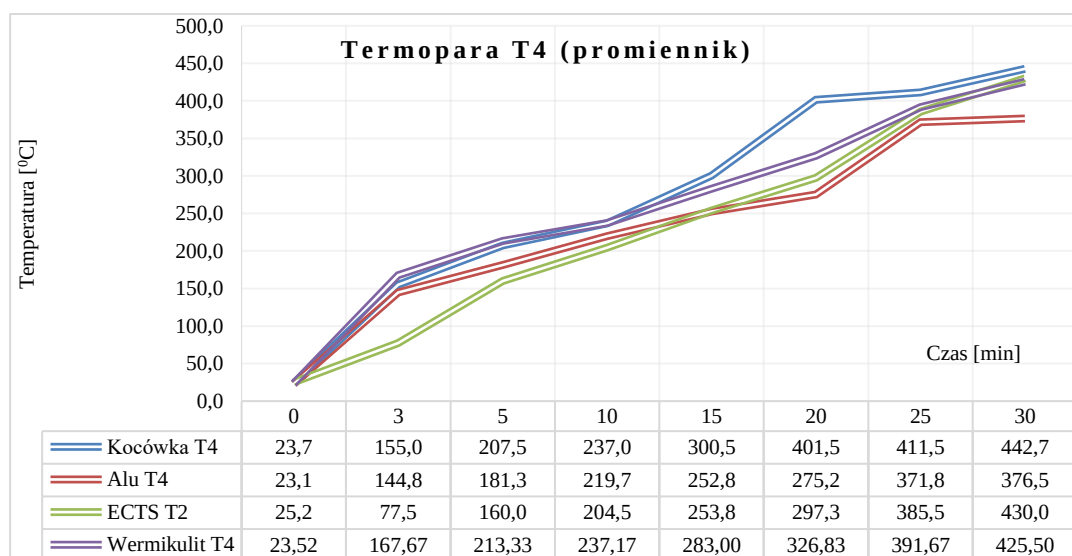
Pełny obraz efektywności materiałów uzyskano poprzez analizę pomiarów temperaturowych z różnych głębokości próbki drewnianej. Pomiary przed i za osłoną materiału technicznego, potwierdzając znaczny wpływ materiału na zmniejszenie intensywności strumienia promieniowania, mimo stosowania bardzo cienkich tkanin o grubości 0,5 - 1,1 mm.

Wykres 18. Temperatury zmierzone przed osłoną z materiału oraz na powierzchni próbki świadek bez osłony



Źródło: Opracowanie własne

Wykres 19. Zmiany temperatury za osłoną przed próbką badawczą



Źródło: Opracowanie własne

7.1.7 Podsumowanie wyników dla próby laboratoryjnej z promiennikami

Przeprowadzone badania laboratoryjne na stanowisku z zestawem promienników IR dostarczyły kompleksowych danych eksperymentalnych dotyczących skuteczności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako zewnętrznych osłon termicznych dla elementów drewnianych z drewna litego iglastego. Opracowana

procedura badawcza, opierająca się na pomiarach głębokości zwęglania i rozkładu temperatur w przekroju próbki, umożliwiła porównawczą ocenę czterech konfiguracji materiałowych oraz próby kontrolnej.

Badania próbek niezabezpieczonych (świadców) ustaliły linię bazową dla oceny efektywności osłon. Próbki kontrolne wykazały średnią głębokość zwęglania na poziomie 18 - 20,5 mm, przy jednoczesnym wystąpieniu spalania płomieniowego w większości próbek w przedziale 26 - 30 minuty badania. Zjawisko spalania płomieniowego, polegające na niezamierzonej emisji płomienia z powierzchni drewna, stanowi istotny czynnik degradujący strukturę i zmienia charakter przebiegu całego procesu termicznego. Szczeliny radiacyjne, widoczne na całej powierzchni próbek kontrolnych, oraz wzbudzenie się pęknięć nawet w strefach bez widocznego zwęglania, wskazywały na niejednorodność i złożoność procesu zwęglania w warunkach niechronionych.

Seria badawcza z powłoką wermikulitową wykazała ten materiał jako szczególnie skuteczny w ograniczeniu szybkości zwęglania. Zmierzone głębokości zwęglania (7,2 - 9,25 mm) reprezentowały redukcję na poziomie ok. 55 - 60% w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Materiał osłonowy zachował ciągłość we wszystkich próbkach, demonstrując wysoką odporność mechaniczną w warunkach ekspozycji termicznej. Ograniczone wstępowanie pęknięć radiacyjnych oraz równomierne zwęglanie wskazywały na efektywne rozproszanie wpływu termicznego. Stabilny przebieg badań bez zapalenia płomieniowego na granicy materiału osłonowego potwierdzał kontrolę nad procesem termicznym. Nagromadzenie produktów smolistych w strukturze materiału, choć widoczne, nie skutkowało zapaleniem w większości przypadków, co wskazywało na zdolność osłony do wyizolowania powierzchni drewna od bezpośredniego dostępu tlenu.

Włókno szklane surowe ECTS o gramaturze 530 g/m² wykazało głębokości zwęglania w przedziale 8,2 - 10,45 mm (redukcja ok. 50 - 55%). Materiał utrzymał ciągłość i elastyczność, jednak pochłaniał znaczne ilości substancji smolistych. Ślady spalania płomieniowego w przestrzeni pod osłoną zaobserwowano dla części próbek, co sugeruje, iż niewielkie uplastycznienie materiału mogło prowadzić do powstania szczelin powietrznych umożliwiających lokalne spalanie. Obecność osmaień i przebarwień na powierzchni materiału stanowi wyróżnik tej serii w stosunku do pozostałych typów osłon.

Materiał określony jako "kocówka" (włókno szklane, gramatura 560 g/m²) wykazał głębokości zwęglenia 8 - 10 mm (redukcja ok. 50 - 55%), przy równomiernym rozkładzie uszkodzeń na powierzchni ekspozycji. Brak obserwacji spalania płomieniowego pod osłoną, w odróżnieniu od serii poprzedniej, wskazywał na istotne znaczenie gramatury i struktury splotu dla kontroli warunków termicznych. Problem "szczepienia" (rozwarstwiania) poszczególnych elementów splotu stanowił jedynie utrudnienie proceduralne i nie wpływa na efektywność ochronną.

Włókno szklane z powłoką aluminiową (jednostronna modyfikacja) wykazało głębokości zwęglenia 7,8 - 11 mm (redukcja ok. 45 - 57%). Znaczne różnice w głębokości zwęglania wynikały z różnic w gęstości materiału osłonowego. Minimalne przebarwienia i nagromadzenia substancji smolistych stanowiły wymierną różnicę w stosunku do materiałów niemodyfikowanych. Jednak powłoka aluminiowa okazała się podatna na lokalną degradację termiczną, przejawiającą się wykruszaniem po badaniu. Ograniczona migracja gazów i wilgoci przez membranę powodowała nadmierne nagromadzenie substancji smolistych i zwiększoną intensywność zadymienia powyżej osłony – zjawisko niezaobserwowane w pozostałych konfiguracjach. Paradoksalnie, ograniczona przenikalność gazowa może stanowić zarówno zaletę (redukcja dostępu tlenu), jak i wadę (gromadzenie produktów pirolizy).

Analiza rozkładu temperatur mierzona za pośrednictwem termopar ujawniła znaczący wpływ osłon tekstylnych na zmniejszenie strumienia promieniowania docierającego do powierzchni drewna. Różnica temperatur między próbkami kontrolnymi i chronionymi powłoką aluminiową osiągała ponad 200°C w początkowej fazie badania. Chociaż różnica nie utrzymywała się w całym cyklu eksperymentalnym, potwierdziło to założenie postawione w planach badawczych dla materiałów jako czasowe zabezpieczenie w początkowej fazie pożaru. Pomiar na kolejnych głębokościach wewnątrz próbek potwierdzały znaczący wpływ na osłabienie strumienia promieniowania już przy bardzo cienkich tkaninach.

Porównując wszystkie serie badawcze, może stwierdzić, że zastosowanie osłon tekstylnych na bazie włókna szklanego redukuje prędkość zwęglania elementów drewnianych średnio o 50 - 60% w stosunku do próbek niezabezpieczonych. Efekt obniżenia szybkości zwęglania wpływa bezpośrednio na opóźnienie utraty nośności

ogniowej chronionego elementu konstrukcyjnego, to kluczowy parametr dla oceny celowości rozwiązania w ujęciu praktycznym.

Niedostateczne aspekty materiałowe wyrażają się w postaci:

- obserwacji spalania płomieniowego w przestrzeni pod osłoną dla niektórych konfiguracji, co wskazuje na potrzebę lepszej kontroli szczelności i szczelin powietrznych,
- różnorodnej degradacji termicznej powłok modyfikowanych (szczególnie aluminium), wymagającej bardziej szczegółowych badań materiałowych,
- znacznego nagromadzenia produktów smolistych, stanowiącego zagrożenie oddzielne wymagające analizy wpływu na efektywność długotrwałą i bezpieczeństwo,
- wrażliwości wyników na zmienność gęstości materiału, zjawisko wymuszające zwiększoną kontrolę spójności materiału w procedurach kwalifikacji.

Zastosowana procedura pomiarowa, oparta na mechanicznym wciśnięciu standardowego elementu do warstwy zwęglonej, wykazała wysoką powtarzalność, choć wymaga dalszej standaryzacji w kontekście wdrażania na inne stanowiska badawcze. Szablon pomiarowy (grubość 2 mm) okazał się narzędziem niezbędnym do zapewnienia porównywalności wyników między próbkami w ramach serii oraz między seriami.

Dane eksperymentalne zebrane w tym rozdziale przedstawiają pierwsze dane liczbowe o redukcji szybkości zwęglania. Uzyskane wartości opierają się na fizycznych pomiarach warstwy zwęglonej oraz zamianie temperatury w elemencie chronionym na trzech głębokościach. Tak przyjęta metoda daje szerszy obraz zmian w zabezpieczonym elemencie. Dodatkowo analiza uszkodzeń w zastosowanych materiałach osłonowych daje informacje o możliwości dalszego testowania tego rozwiązania w próbie poligonowej. Wyniki z próby laboratoryjnej połączone z opisanymi w późniejszym rozdziale próby poligonowej dają podstawy do wniosków o przydatności osłon tekstylnych jako rozwiązania o znaczeniu praktycznym w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

7.2 Badania laboratoryjne na stanowisku z promiennikiem i palnikiem gazowym

7.2.1 Wyniki badań dla poszczególnych grup badawczych

Badania przeprowadzone z użyciem zarówno promienników IR, jak i palnika wykazały wyniki porównywalne z wariantem z wyłącznie promiennikami. Temperatury mierzone na powierzchni próbek były nieznacznie podwyższone. Temperatury na powierzchni materiałów mierzone w obu wariantach były zbliżone, co nie stanowiło pierwotnego założenia badawczego, jednak umożliwiło porównanie efektów obu mechanizmów termicznego obciążenia.

Znaczące różnice obserwowano natomiast w charakterze i stopniu degradacji materiałów osłonowych. Materiały bez modyfikacji (włókno szklane surowe) nie wykazały znaczących różnic w uszkodzeniach w porównaniu z wariantem z użyciem wyłącznie promienników IR. Natomiast materiały z modyfikowanymi powłokami, szczególnie z aluminium, ulegały znacznie bardziej intensywnej degradacji.

Powłoka aluminiowa wykazywała znaczne lokalne uszkodzenia, praktycznie całkowitą degradację w obszarze bezpośredniego kontaktu z płomieniem. Stopień uszkodzenia był na tyle znaczący, że podczas demontażu osłon materiał wykazywał kruszenie się i łamanie, skutkując powstaniem lokalnych pęknięć oraz ubytków materiału o wymiarach do 5×5 cm. Pozostały materiał wykazywał podatność na kruszenie się nawet przy niewielkim mechanicznym obciążeniu.

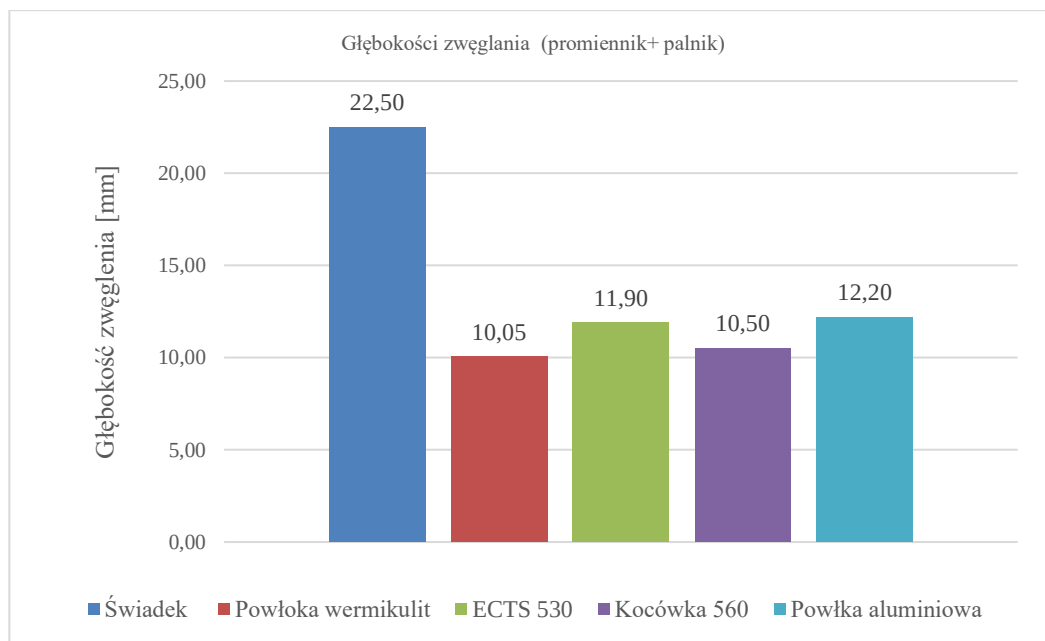
Podczas ekspozycji na płomień zaobserwowano lokalne wybrzuszenia i wzdęcia materiału, wynikające z intensywnego wydzielania produktów gazowych w wyniku ograniczonej przepuszczalności gazowej osłony z aluminium.

Materiał wermikulitowy wykazywał intensywniejsze zmiany zabarwienia na poszczególnych obszarach. Zakres zmian barwy był większy o około 10 - 15% w porównaniu z wariantem z wyłącznie promiennikami. W obszarze bezpośredniej ekspozycji na płomień, materiał wermikulitowy wykazywał zmniejszoną elastyczność, w tej lokalizacji, jednak zachowywał strukturalną ciągłość bez oznak rozwarstwiania.

Próbka referencyjna po zainicjowaniu pracy palnika wykazała w każdym przypadku spalanie płomieniowe po około 30 - 40 sekundach oraz zapalenie się produktów smolistych rozprzestrzeniające się w kierunku krawędzi próbki.

Zmierzone głębokości zwęglania były większe o około 2 - 2,5 mm w porównaniu z wariantem z wyłącznie promiennikami. Obserwacja ta nie dotyczy próbki referencyjnej, gdzie głębokość zwęglania wzrosła w porównaniu z wariantem z promiennikami o około 4 mm. Poniżej zamieszczono zestawienie z uzyskanymi średnimi wartościami głębokości zwęglania.

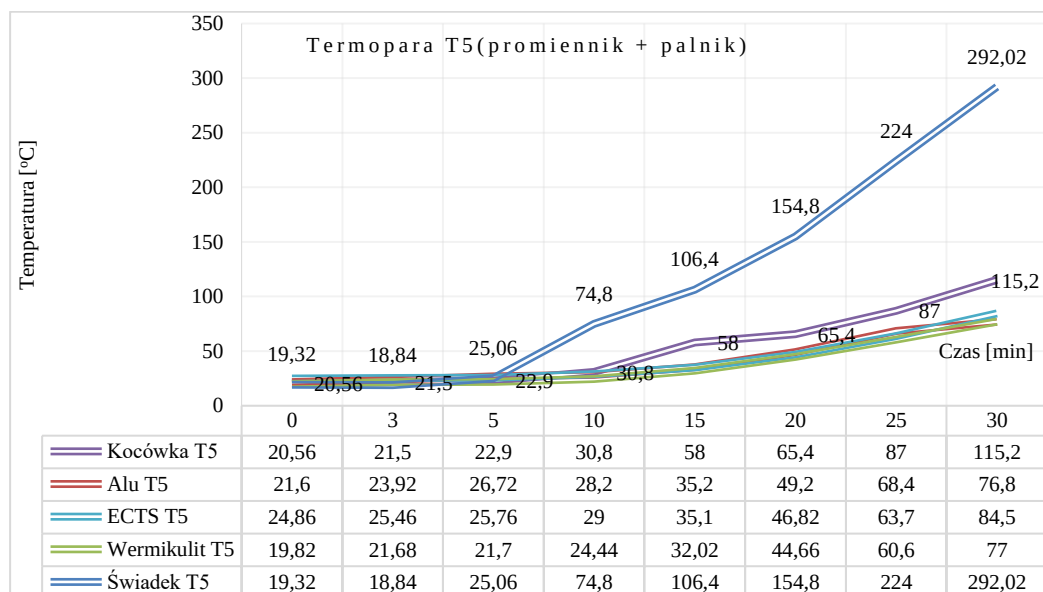
Wykres 20. Głębokość zwęglania próbki: świadek oraz przy zastawianiu poszczególnych materiałów osłonowych



Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań laboratoryjnych

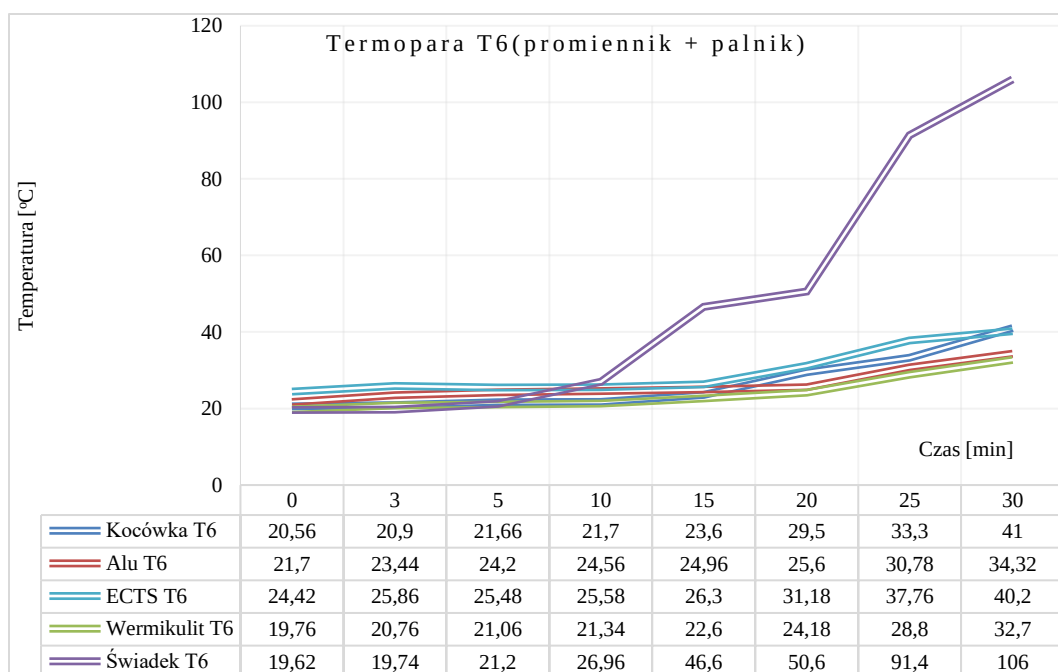
Poniżej dla porównania wykresy uzyskanych temperatur na poszczególnych głębokościach próbki oraz ograniczenie temperatury za osłoną z materiału technicznego na bazie włókna szklanego.

Wykres 21. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 25 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



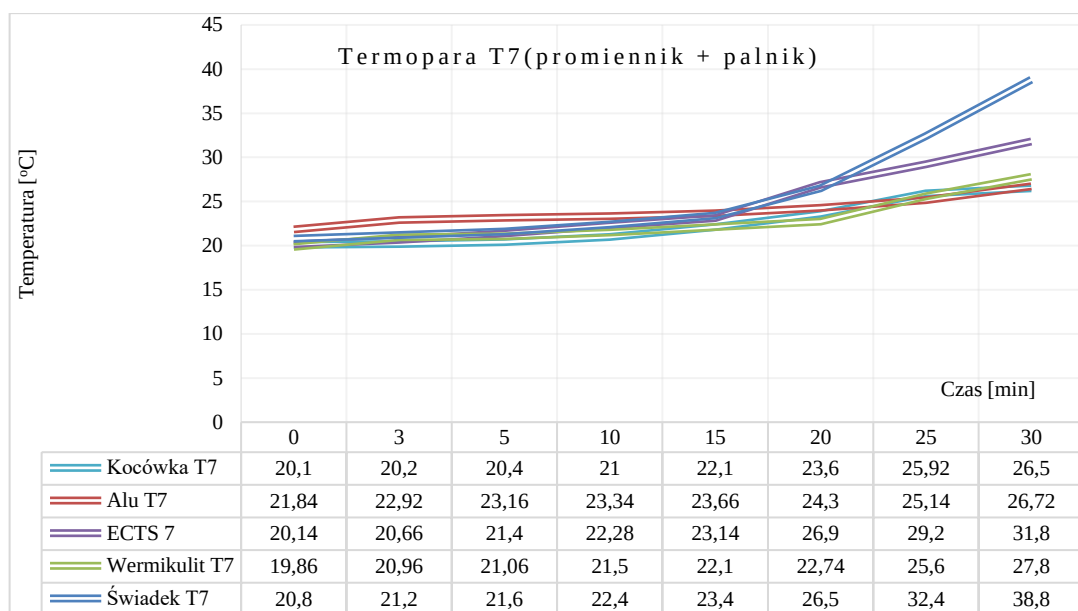
Źródło: Opracowanie własne

Wykres 22. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 45 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



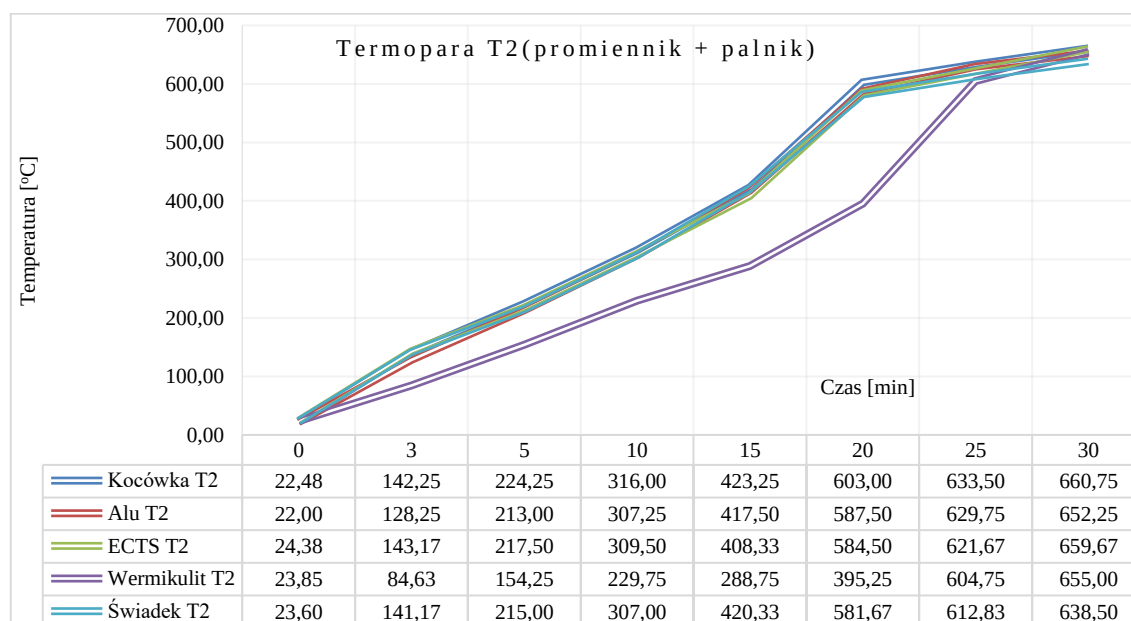
Źródło: Opracowanie własne

Wykres 23. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 60 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania



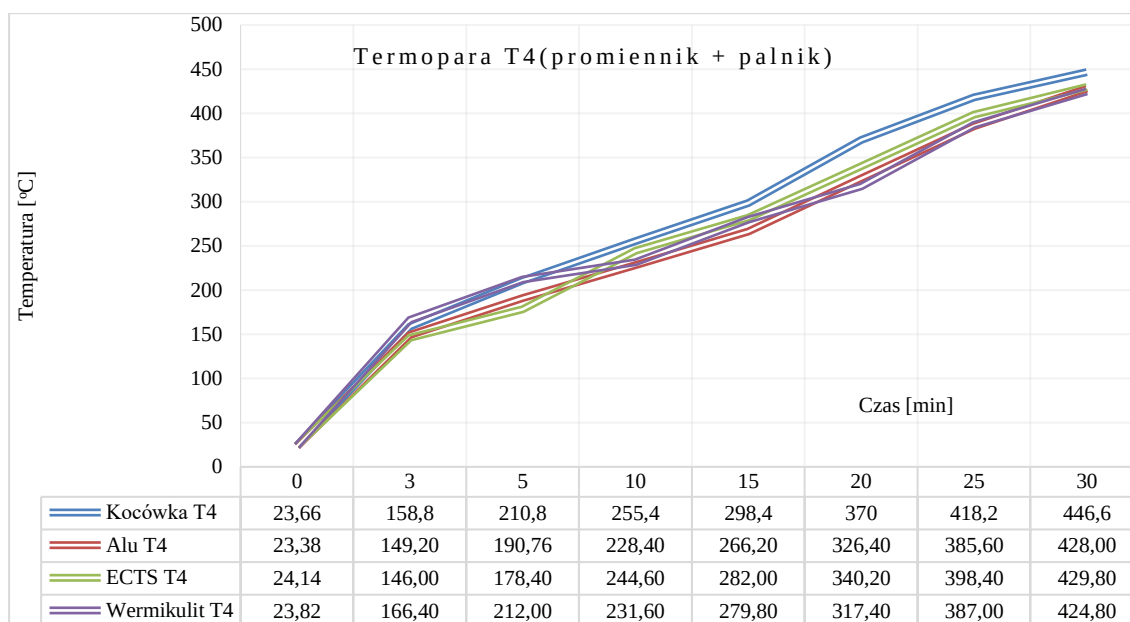
Źródło: Opracowanie własne

Wykres 24. Temperatury zmierzone przed osłoną z materiału oraz na powierzchni próbki
świadek bez osłony



Źródło: Opracowanie własne

Wykres 25. Temperatury zmierzone za osłoną z materiału technicznego w czasie próby z
palnikiem i promiennikiem.



Źródło: Opracowanie własne

Przedstawione powyżej wykresy, zestawienia wskazują na zwiększenie szybkości zwęglania przy działaniu dwóch czynników, jednak największy wpływ obserwowany jest na poziomie destrukcji osłon z modyfikacjami w stosunku do próby podstawowej. Potwierdzenie tej zmiany uzyskano również w badaniach poligonowych, jednak będzie to opisane szczegółowo w późniejszym etapie.

7.3 Podsumowanie badań laboratoryjnych i wnioski do próby poligonowej

Niniejszy rozdział zawiera podsumowanie kompleksowych badań laboratoryjnych skuteczności tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako zewnętrznych osłon termicznych dla elementów drewnianych litych iglastych. Program obejmował dwie metodyki badawcze (promienniki podczerwieni oraz kombinację promienników i palnika gazowego), cztery konfiguracje materiałowe oraz próbkę kontrolną. Istota badań polegała na pomiarze głębokości zwęglania, rozkładu temperatur w przekroju próbek oraz ocenie degradacji termicznej materiałów osłonowych w warunkach kontrolowanego pożaru laboratoryjnego.

Osłony tekstylne na bazie włókna szklanego redukują szybkość zwęglania elementów drewnianych średnio o 50 - 60%. Redukcja ta wpływa bezpośrednio na opóźnienie utraty nośności ogniowej chronionego elementu – parametr kluczowy dla oceny przydatności rozwiązania. Efekt ochronny utrzymuje się zarówno w warunkach samego promieniowania, jak i przy łączonym oddziaływaniu promieniowania i płomienia.

Materiał z modyfikacją wermikulitową wykazał najwyższą efektywność (55 - 60% redukcja) i największą stabilność termiczną. Włókna szklane surowe wykazały porównywalne efekty (50 - 55%), jednak z wymagającymi uwagi aspektami technologicznymi dotyczącymi kontroli spalania płomieniowego. Powłoka aluminiowa wykazuje podatność na degradację w warunkach łączonego pożaru (promienniki + palnik).

Tkanina o gramaturze 530 g/m² wykazała wyraźnie gorsze cechy obserwacyjne (morfologię uszkodzeń), jednak zmniejszyła zwęglanie na poziomie 50 - 55%. Różnica głębokości zwęglania wynosząca 0,45 mm w stosunku do materiału o gramaturze 560 g/m² stanowi wartość nieznaczną w kontekście praktycznym. Rozbieżności wynikają z różnic materiałowych i technologicznych, nie zaś z fundamentalnych ograniczeń koncepcji. Ze względów praktycznych materiał ten wyłączono z badań poligonowych, jednak obserwacje uzasadniają odrębne, pogłębione opracowanie w przyszłym planie badawczym.

Dane eksperymentalne stanowią fundament do porównania z badaniami w pełnej skali. Procedura pomiarowa wykazała wysoką powtarzalność między próbkami. Mechanizmy ochrony termicznej zostały scharakteryzowane poprzez analizę rozkładów temperatur, umożliwiając aplikację danych w innych badaniach czy porównaniach.

Badania laboratoryjne potwierdzają potencjał tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako rozwiązania nienormatywnego (tzw. rozwiązania zamienne), dla scenariuszy, w których tradycyjne metody zabezpieczenia są niemożliwe do zastosowania – takie jak obiekty zabytkowe, elementy o złożonej geometrii lub fazy tymczasowe realizacji inwestycji. Przydatność praktyczna wymaga jednak potwierdzenia w badaniach poligonowych, których rezultaty będą decydujące dla ostatecznej oceny rozwiązania.

ROZDZIAŁ 8. BADANIA POLIGONOWE — WERYFIKACJA W SKALI MAKRO

8.1 Cel i założenia badań poligonowych

Niniejszy rozdział służy realizacji głównego celu rozprawy, tj. weryfikacji skuteczności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego w warunkach zbliżonych do pożaru rzeczywistego. Badania poligonowe stanowią etap przejściowy między skalą laboratoryjną a skalą naturalną i pozwalają na weryfikację hipotezy dotyczącej zdolności tkanin do zmniejszenia prędkości zwęglania elementów nośnych z drewna litego iglastego.

8.1.1 Uzasadnienie przejścia ze skali laboratoryjnej do makro

Stanowiska laboratoryjne z promiennikiem podczerwieni i palnikiem otwartym odwzorowują komponenty pożaru w kontrolowanych warunkach, ale nie odzwierciedlają złożoności rzeczywistej wymiany ciepła, dynamiki przepływu gazów i wpływu otoczenia. Badania poligonowe, prowadzone na ścianie drewnianej z praktyką stosowania tkanin zbliżoną do rzeczywistych warunków budowlanych, dostarczają empirycznych danych na temat rzeczywistej skuteczności osłony. Wyniki poligonowe mogą stanowić podstawę do ekstrapolacji na elementy rzeczywiste w ograniczonym zakresie.

8.1.2 Trzy tkaniny wytypowane do prób poligonowych

Ranking przeprowadzony na podstawie badań laboratoryjnych wskazał trzy tkaniny o najlepszych parametrach zmniejszenia prędkości zwęglania i zachowania temperatury powierzchni drewna. Tkaniny te zostały wytypowane do badań poligonowych. Z zestawu badanego w laboratorium do badań poligonowych nie została zakwalifikowana tkanina ECTS 530. Jednak nie ze względu na całkowity brak przydatności, tylko na mniejszy poziom ochrony i dodatkowe ujemne cechy, które muszą zostać dokładniej przebadane przed dalszymi testami. Warto zauważyć, że testowane w skali makro materiały i ich wybór podyktowany był już wcześniej opisanymi cechami techniczno - użytkowymi oraz wynikami badań laboratoryjnych.

8.2 Projekt stanowiska poligonowego

8.2.1 Koncepcja i wymiary ściany badawczej

Stanowisko poligonowe zaprojektowano jako ścianę drewnianą, stanowiącą część rzeczywistej konstrukcji drewnianych budynków, jednocześnie stanowiącą mierzałne laboratorium do obserwacji zjawisk pożarowych. Wymiary całej ściany: szerokość 2,0 m, wysokość 2,5 m. Układ badawczy jest indywidualny i przyjęty przez autora jako koncepcja badawcza. Do wykonania całej ściany badawczej wykorzystano typowe materiały stosowane w budownictwie.

8.2.2 Konstrukcja ściany - struktura materiałowa

Ściana zbudowana jest z deskowania pełnego o grubości 2,5 cm tworzącego tylną podwalinę dla mocowania elementów badanych, na którym przymocowane są cztery główne belki konstrukcyjne o wymiarach 8×16 cm, ustawione pionowo i rozmieszczone w odstępach 27 cm (mierząc od zewnętrznych powierzchni belek). Każda belka mocowana jest do deskowania za pomocą wkrętów ciesielskich 6×10 mm, umocowanych w 10 punktach po długości belki (co ~ 25 cm), mocowanych od strony deskowania. Dla zapewnienia sztywności układu każda belka jest zamocowana wkrętami ciesielskimi po jednym na dole i górze belki od strony ekspozycyjnej. Trzy belki zostały osłonięte badanymi tkaninami; czwarta belka (belka referencyjna) pozostawała bez osłony do celów porównawczych. Lokalizacja belek na ścinanie jest losowa. Przed wypełnieniem przestrzeni między belkami opisaną poniżej płytą, belki wybrane zostały osłonięte materiałami zgodnie z wyborem po próbie laboratoryjnej. Mocowanie materiału odbywało się za pomocą zszywek tapicerskich, mocowanie pozostaje w części osłoniętej przez płytę GKF, co zapewnia odizolowanie elementów mocujących od czynników pożarowych. Brak dokładnej izolacji od czynników pożarowych mogło mieć wpływ na lokalne zmiany w przewodności cieplnej. Jedynie na początku i końcu każdej belki zszywki są odsłonięte, jednak są one mocowane w odległości ok 2 cm od końców danej belki. Ten obszar nie jest brany pod uwagę w ocenie głębokości zwęglania. Materiał zastosowany do osłony belek przylega ściśle i jest zastosowany jednowarstwowo. Ewentualne nieszczelności na styku belka czy materiał osłonowy z płytą GKF zostały wypełnione masą pęczniącą identyczną jak w badaniach laboratoryjnych.

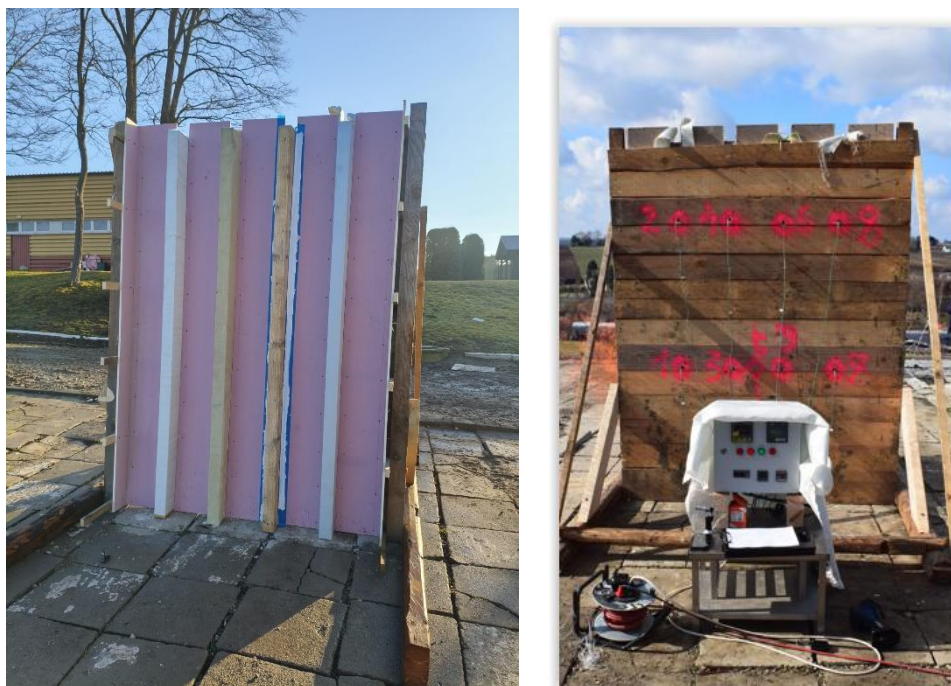
Przestrzeń między belkami wypełniona została płytą gipsowo - kartonową (GKF) o grubości 12,5 mm, a boki ściany osłonięte są ślepyimi osłonami o wysokości 18 cm,

które wyrównywały warunki ekspozycji dla belek skrajnych (eliminujące efekty brzegowe). Mocowanie płyty odbywa się wkrętami KSGP 5 x 35 po dwa rzędy dla każdej płyty.

W celu zapewnienia sztywności i stabilności konstrukcji w czasie testów została ona wsparta konstrukcją ciesielską z drewna litego.



Rysunek 60. Struktura ściany badawczej w czasie przygotowania do badań



Rysunek 61. Ścianka badawcza przed testami na stanowisku poligonowym

Belki zabezpieczone materiałem osłonowym posiadały wilgotność ok 15 - 16%. Po zamontowaniu osłon tekstylnych i zakończeniu pracy przy stanowisku były one przetrzymywane w hali magazynowej o temperaturze w przedziale 12 – 15°C i wilgotności ok. 40 - 50%. Czas od zakończenia prac przy stanowisku do wykonania testów to 34 dni.

8.2.4 Instrumentacja pomiarowa i towarzysząca.

System pomiarowy oparto na termoparach typu K, które wcześniej wykorzystywane były w testach laboratoryjnych. Do zapisu danych z termopar umiejscowionych w ścianie badawczej wykorzystano rejestrator APAR 207 dla ośmiu termopar. Natomiast dziewiąta termopara mierząca temperaturę na górnej powierzchni stosu w odległości 15 cm od ściany - odczyt i zapis realizowany manualnie. W każdej belce umiejscowione dwie termopary na wysokości 100 i 200 cm wprowadzone zostały od tylnej strony stanowiska na głębokości 8 cm belki. Montaż osiowy, otwory przygotowano na etapie budowy stanowiska w warsztacie w celu zapewnienia dokładnego osiowego montażu termopar i ich głębokości już w końcowym wykonaniu stanowiska.

Rejestracja danych temperaturowych przez rejestrator odbywała się co 10 sekund (w późniejszym etapie wykonano uśrednioną wartość dla danych 60 s), natomiast dla termopary z zapisem manualnym co 1 min przez całą ekspozycję. Równocześnie prowadzona było rejestracja wideo oraz zapis termograficzny.

W celu zapewnienia odpowiednich warunków pomiarowych w trakcie całego badania monitorowane były takie parametry jak: wilgotność powietrza, siła i kierunek wiatru. Zdjęcia poniżej przedstawiają odczyt w czasie 10 min przed rozpoczęciem testu.



Rysunek 62. Pomiar warunków środowiskowych na stanowisku badawczym

W trakcie badania stacja pomiarowa znajdowała się na wysokość ok. 1,5 m od poziomu gruntu wzdłuż osi ściany w odległości ok. 3,5 m. Maksymalna zmierzona wartość podmuchów wiatru to 1,1 m/s.

W celu zminimalizowania wpływu warunków atmosferycznych w postaci wiatru zastosowano osłony o wysokości 2 m i długości po 5 m z prawej i lewej strony stanowiska



Rysunek 63. Widoczne osłony przeciwwiatrowe w trakcie badania

8.3 Źródło ognia - stos drewnianych beleczek

8.3.1 Parametry stosu i gatunek drewna

Źródłem ognia był stos drewnianych beleczek o wymiarach 150 cm (długość) $\times$ 100 cm (szerokość) $\times$ 100 cm (wysokość), zbudowany z beleczek 5 $\times$ 5 cm z drewna sosnowego. Stos rozmieszczony był w odległości 5 cm od powierzchni ściany badawczej (tj. od najbliższej belki poddanej analizie). Stos ułożono na dystansach niwelujących nierówność terenu. Maksymalna odległość dolnej warstwy stosu od podłoża to 6 cm a minimalna 1,5 cm. Belecze poddano procesowi obróbki mechanicznej w postaci strugania i standaryzacji. Tolerancja wymiaru to $\pm$ 1 mm.

Przed ustawieniem na stanowisku beleczki były sezonowane i suszone do poziomu w przedziale 9-10% w laboratorium.



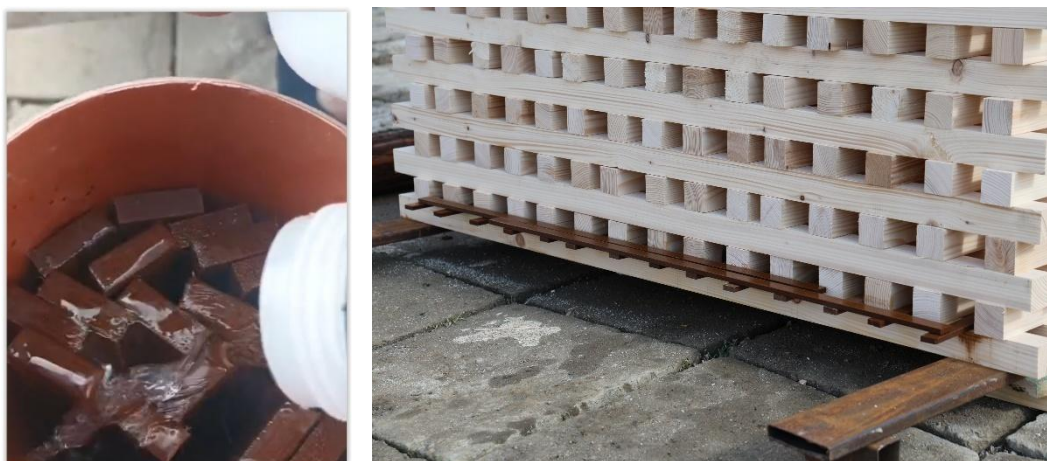
Rysunek 64. Suszenie beleczek w laboratorium oraz gotowy stos na stanowisku



Rysunek 65. Pomiar wilgotności przed rozpoczęciem testów poligonowych

8.3.2 Procedura zapalenia stosu

Zapłon stosu następował za pomocą preparatu palnego: paski z płyty wiórowej o wymiarach $2,5\text{ cm} \times 1,2\text{ cm} \times 100\text{ cm}$, nasączone benzyną lakową. Nasycenie nastąpiło przez zanurzenie pasków w pojemniku - zdjęcie poniżej. Do nasycenia użyto łącznie ~5 litrów na całą procedurę. Paski w czasie 10 min procedury wchłonęły ok 3,5 l benzyny lakowej.



Rysunek 66. Nasączanie beleczek oraz ich umiejscowienie w stosie badawczym

Przed rozpoczęciem testu tj. podpaleniem stosu, paski w czasie ok. 3 min wcześniej zostały wyciągnięte z kąpieli w benzynie i ułożone w dolnej warstwie. Dwa paski ułożone były krzyżowo w drugiej warstwie stosu (licząc od podstawy), umożliwiając równomierny rozkład płomienia. Po zapaleniu pasków płomień równomiernie obejmuje pozostałe nasączone elementy, zapewniając powtarzalne warunki testowe. Po zapłonie stos spalał się naturalnie bez interwencji.



Rysunek 67. Inicjacja pożaru testowego (zapalenia nasączonych pasków w dolnej warstwie).

8.4 Warunki i przebieg prób poligonowych

Zgodnie z przyjętymi założeniami dla wykonania próby poligonowej składała się ona z następujących etapów:

- przygotowanie stanowiska: ułożenie stosu z beleczek, kontrola wilgotności i rozstawu w stosie elementów drewnianych, impregnacja pasków użytych do zapalenia przez czas 10 min, montaż pasków w stosie max 5 min przed zapaleniem, kontrola aparatury pomiarowej jak rejestrator, termopary ich poprawny montaż, warunki klimatyczne,
- podpalenie stosu: płomieniem otwartym tylko paski wystające poza obrys stosu, czas podpalania ok. 10 s,
- spalanie w czasie T - 30 min. T - 0 czas rozpoczęcia procedury podpalania. Po czasie 30 min rozpoczyna się proces gaszenia prądami kroplistymi w celu dogaszenia pożaru testowego, schłodzenia elementów badanych i ściany,
- po schłodzeniu ściany do temperatury ok. 30°C następuje pierwsza wizualna ocena oraz demontaż ściany od konstrukcji wsporczej. Po zdemontowaniu ścianka ze wszystkimi elementami zostaje złożona do magazynu na okres ok. 24 godz. Po tym czasie następuje pełna ocena uszkodzeń i dogłębna analiza poszczególnych części, tj. głębokości zwęglania, uszkodzeń materiałów osłonowych oraz zapisów z aparatury pomiarowej.

Wykonana próba poligonowa w całości wypełniła założenia przyjęte do jej przeprowadzenia, w żadnym etapie nie napotkano na utrudnienia czy inne elementy mogące mieć wpływ na końcowe wnioski i wyniki. Jedyny element, który nie był przewidziany w planowanym przebiegu próby, to pojawienie się czasowego zadymienia na tylnej ścianie od strony stanowiska pomiarowego. Jednak proces ten obserwowany był do czasu rozpalania stosu (ok. 5 min), potem widoczna ilość zadymienia była znikoma.

8.4.1 Źródła niepewności w warunkach poligonowych

Badania poligonowe podlegają większym źródłom niepewności niż eksperymenty laboratoryjne. Zmienna prędkość i kierunek wiatru powodują asymetrię strumienia cieplnego, a warunki atmosferyczne (temperatura, wilgotność) bezpośrednio wpływają na kinetykę spalania. Niepewność pomiarów temperaturowych (większa niż w laboratorium), tj. 4°C wyliczona na podstawie rozbieżności między termoparami w jednakowych pozycjach logicznych na różnych belkach. Jest to spowodowane nierównomiernym nasłonecznieniem ściany badawczej. Mimo ustabilizowanych

warunków klimatycznych jak temperatura otoczenia, wilgotność oraz siła i kierunek wiatru spontaniczne podmuchy w opisanej wartości, które występowały w czasie ok. 5 min w czasie całej próby mogą mieć wpływ na wynik w szczególności skrajnej belki (lewa, parząc od frontu ściany).

8.5 Wyniki badań poligonowych

8.5.1 Przebieg badania w ujęciu czasowym

Przebieg całego badania poligonowego został podzielony na kilka ważnych etapów związanych ze zjawiskami zachodzącymi w czasie próby, zbieżności czasowe przedstawione poniżej.

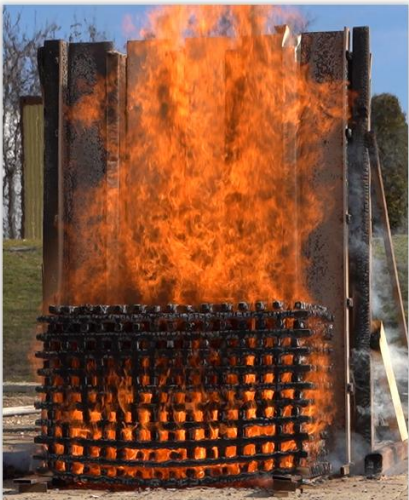
Tabela 13. Przebieg badania poligonowego

Czas	Opis	Zdjęcie poglądowe
0'00''	Rozpoczęcie badania podpalenie nasączonych listewek.	
2'00''	Płomienie obejmują całą dolną warstwę beleczek.	
3'00''	Płomienie sięgają górnej powierzchni stosu (po bokach stosu).	

4'20''	Stos w pełni objęty płomieniem.	
5'12''	Spalanie płomieniowe na zewnętrznej powierzchni elementu B niezabezpieczony.	
6'00''	Przebarwienia na płytach GKF przyległych do elementu niezabezpieczonego. Pierwszy widoczny biały obłok nad górną częścią elementu A. Spalanie płomieniowe na całej wysokości elementu B.	
6'15''	Widoczne pierwsze zwęglenia elementu B (Zmiany barwy zewnętrznej powierzchni – jasne przebarwienia).	
6'20''	Zapalenie odparowanej frakcji nad elementem A.	

6'50''	Przebarwienie płyty GKF przyległej do mat A widoczne dalsze odparowywanie powyżej osłony elementu A.	
7'30''	Zmiana barwy na ciemną – czarną powłoki elementu C oraz powolne przebarwienie powłoki elementu D.	
7'50''	Spalanie płomieniowe na powierzchni osłony elementu D.	

10'40''	Niewielkie spalanie powyżej osłony elementu C oraz płomienie nad elementem D o wysokości ok 15 cm.	
11'20''	Ponowne spalanie płomieniowe nad elementem A.	
12'20''	Powstaje wzdłużne pęknięcie materiału na dł. ok 50 cm na krawędzi elementu A.	

15'00''	Widoczne pęknięcie na krawędzi materiału osłonowego elementu D.	
16'00''	Przepalenie dolnej warstwy beleczek – oparcie stosu o płyty betonowe.	
17'50''	Przez pęknięcie wzdłużne mat z elementu A następuje spalanie odparowanych produktów.	

18'20''	Zapadnięcie dziesięciu dolnych warstw beleczek.	
18'30''	Odspojenie części osłony na elemencie A powyżej stosu na dł. ok 20 - 25 cm.	
20'00''	Zapadnięcie i przewrócenie stosu.	

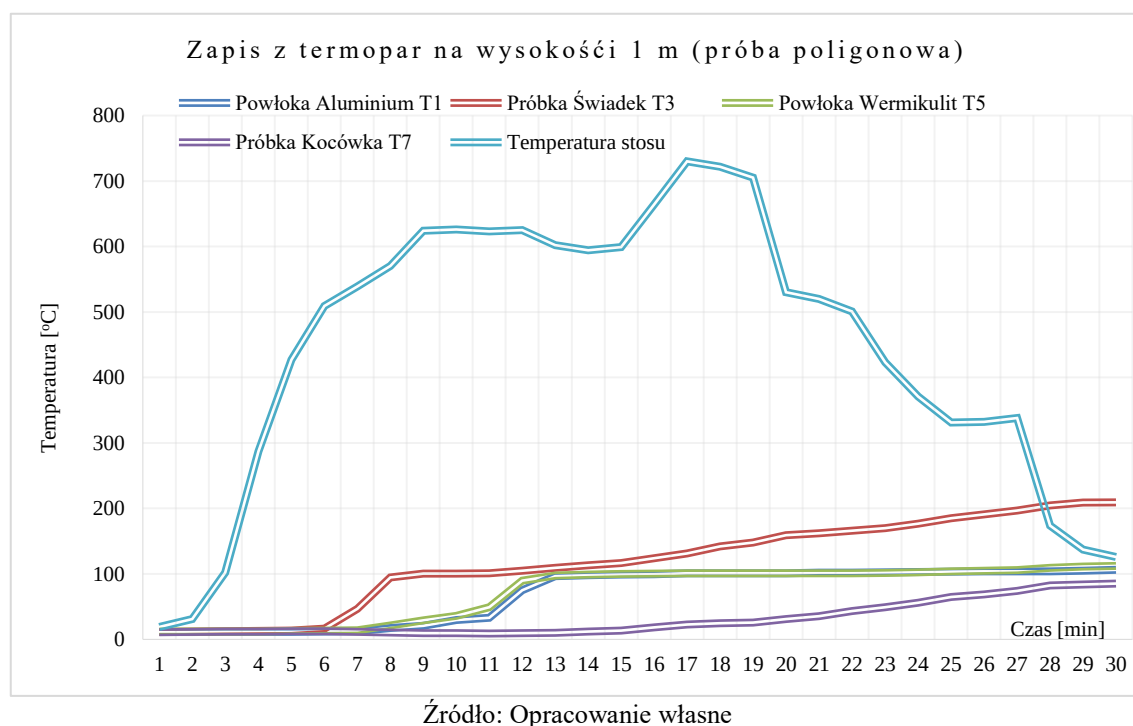
20'00''	Po przewróceniu stosu widoczne pęknięcia materiału osłonowego na elementach A, C i D do pierwotnej wysokości stosu.	
21'30''	Rozerwanie powłoki zabezpieczającej elementu A na wysokości ok 1,7 m na dł. ok 20 cm.	
30'00''	Zakończenie próby – gaszenie.	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie testu poligonowego

8.5.2. Przebieg temperaturowy - krzywe czasowe dla trzech tkanin i próby referencyjnej

Na podstawie wykonanej próby poligonowej oprócz analizy wizualnej uszkodzeń oraz głębokości zwęglenia i uszkodzenia materiałów znaczącym elementem badawczym jest analiza rozkładu temperatur w punktach pomiarowych tj. na wysokości 1 i 2 m oraz temperatury na wysokości górnej części stosu, co zostało przedstawione poniżej. Na podstawie rozkładu temperatur – przegrzewania elementów w głąb można określić wpływ osłony na osłabienie strumienia promieniowania cieplnego oraz bezpośredniego działania płomienia na zabezpieczony element, a co bezpośrednio z tym jest związane, szybkością zwęglania materiału zabezpieczonego.

Wykres 26. Temperatura poszczególnych elementów na gł. 8 cm i wysokości 1m oraz porównawczy wykres temperatury na wysokości spalanego stosu

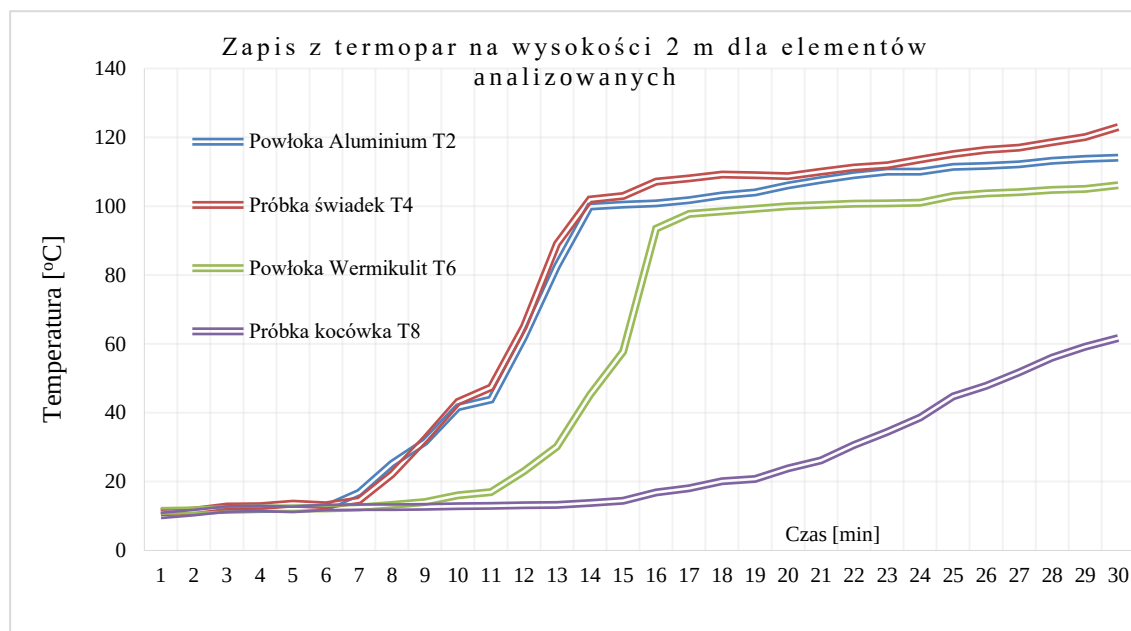


Jak można stwierdzić na podstawie zamieszczonego powyżej wykresu, duża zmienna dynamika spalania w analizowanym badaniu poligonowym nie przekłada się wprost na skokowe zmiany temperatury badanych elementów. Nawet przy powolnym wygaszaniu nadal postępuje powolny wzrost temperatury, a co z tym jest nierozdzielnie związane - zmiany strukturalne. Mechanizm ten był opisany w części teoretycznej pracy, a jego wpływ jest nierozdzielnie związany z końcową wytrzymałością elementu drewnianego. Zastosowane materiały, globalnie analizując odczyt z termopar, w sposób

znaczny obniżają temperaturę za przegrodą, wpływają na zmniejszenie szybkości pirolizy. W końcowym etapie próby poziom osłabienia w belkach osłoniętych tkaniną w porównaniu z próbą świadek sięga blisko 100%.

Przedstawione powyżej odczyty temperatury stosu pochodzą z punktu pomiarowego, który pokrywał się z górną powierzchnią spalanego stosu z drewna. Wpływ czynników zewnętrznych z racji wysokości został w znaczny sposób zminimalizowany, ponadto wysokość osłon ograniczyła do minimum wpływ ewentualnych zawirowań powietrza i podmuchów, które jak już wspomniano, były nieznaczne i przez incydentalny okres.

Wykres 27. Temperatura poszczególnych elementów na gł. 8 cm i wysokości 2 m



Źródło: Opracowanie własne

Przedstawione wyniki są zbieżne z zapisami z termopar na wysokości 1 m, różnica w ograniczeniu wpływu tkanin jest mniejsza, jednak nadal widoczny jest znaczny spadek temperatury dla elementów zabezpieczonych tkaniną. Odczyt dla materiałów tzw. kocówka i znaczny spadek temperatury będą analizowane w dalszej części. Zauważalny jest też ważny aspekt dla termopar na wysokości 1 jak i 2 m w zakresie przesunięcia czasowego przegrzewania materiału. Dla termopar na wysokości 1 i 2 m uzyskanie temperatury 100°C zostało przesunięte o ok. 4 - 5 min, co realnie wydłuża czas na zachowanie parametrów mechanicznych elementu.



Rysunek 68. Punkty pomiarowe i oznaczenie elementów badanych od strony stanowiska pomiarowego

Tabela 14. Odczyty z termopara [°C] w trakcie próby poligonowej zgodnie z lokalizacją jw.

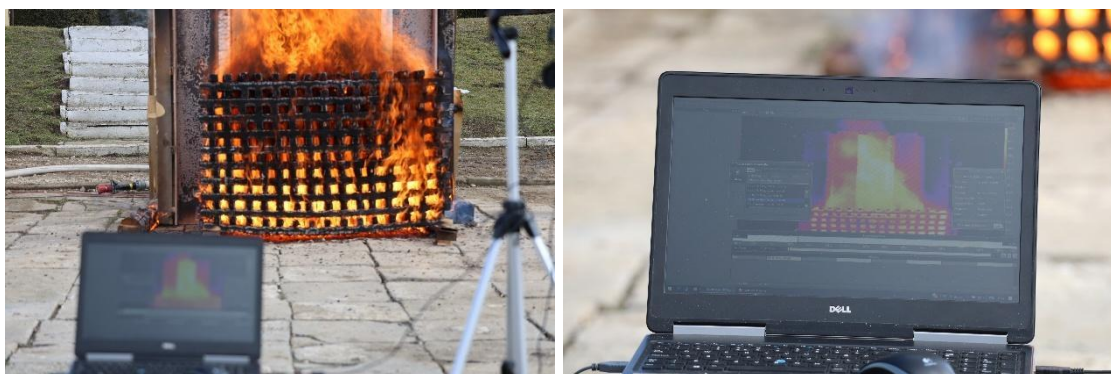
	Powłoka Alu A		Próbka świadek B		Powłoka wermikulit C		Kocówka		Temp. stos
Czas [min]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	11,2	11,2	11,2	11,1	12	11,5	10,9	10,2	19
2	11,2	11,5	11,8	11,6	12	11,7	11,5	11	31
3	11,3	11,8	12,3	12,8	12	12	11,8	12	102
4	11,4	12	12,8	12,9	12,1	12,2	12	12,2	287
5	11,5	12,1	13,5	13,6	13	12,2	12,2	11,9	427
6	11,7	12,5	16,2	13,1	13,3	12,2	12,2	12,5	509
7	12,6	16,8	46,8	14,5	14	12,5	11,6	12,6	539
8	17,1	25,2	94,8	22,2	21,3	13,2	10,4	12,6	570
9	20,7	31,6	100,4	32,3	29	14,1	9,5	12,7	624
10	29,5	41,6	100,6	43,2	36	16	9,6	12,9	626
11	32,9	43,8	101	47,4	49	17	8,9	13	623
12	75	61,9	105	65	89,7	23	9,4	13,1	625
13	96,4	82,5	109	89	97,3	30,2	10,1	13,2	602
14	97,8	99,9	113	102	99	45,1	11,8	13,8	594
15	99,1	100,5	116,5	103	99,7	57,8	13,2	14,4	599
16	99,6	100,8	123,7	107,2	100,4	93,5	18,1	16,9	664
17	100,8	101,8	131	108,1	100,7	97,8	22,9	18,1	730
18	100,9	103,2	142	109,2	100,9	98,5	24,7	20,1	722
19	101	104	148	109	101	99,3	25,7	20,8	705
20	101	106	159	108,7	101	100,2	30,9	23,8	530
21	102	107,6	162	110	101	100,4	35,5	26,2	520
22	102	109	166	111,3	101	100,7	43	30,6	501
23	102,2	110	170	111,9	101,4	100,8	49,2	34,4	423

	Powłoka Alu A		Próbka świadek B		Powłoka wermikulit C		Kocówka		Temp. stos
24	103	110	176,7	113,6	102,4	101	55,7	38,6	371
25	103,5	111,4	185	115,2	103,9	103	64,6	44,8	331
26	103,7	111,7	190,7	116,4	105	103,7	68,6	47,8	332
27	103,9	112,2	196,6	117	106	104,1	73,9	51,7	338
28	104	113,2	204,5	118,6	109,4	104,7	82,4	56	174
29	105	113,8	208,9	120,1	111	105	84	59,2	137
30	106,2	114,1	209,2	123	112,1	106,1	85,2	61,7	126

Źródło: Opracowanie własne

W celu dokładnego zobrazowania zmian temperatury w poszczególnych punktach przedstawiono zestawienie tabelaryczne, gdyż z racji dużej ilości danych nie są one możliwe do wyświetlenia na wykresie w sposób czytelny. Dodatkowo mogą umożliwić inne porównania celowości zastosowań lub wskazanie anomalii pomiarowych.

W celu weryfikacji danych zebranych z termopar w trakcie trwania całego pożaru testowego wykonano pomiary termowizyjne do dokładniejszego zobrazowania zmian zachodzących w czasie pożaru.



Rysunek 69. Zapis termowizyjny w trakcie badania poligonowego

Poniżej przedstawiono wykresy opracowane na podstawie termogramów i uśrednionej wartości odczytu temperatury w trakcie całego testu. Pole obliczeniowe uwzględnione do analizy zostało podzielone na dwie części. Pierwsza to przedział czasowy do zawalenia się sosu z beleczek, a drugi po jego zapadnięciu. Podział spowodowany jest koniecznością przełączenia zakresów pomiarowych.

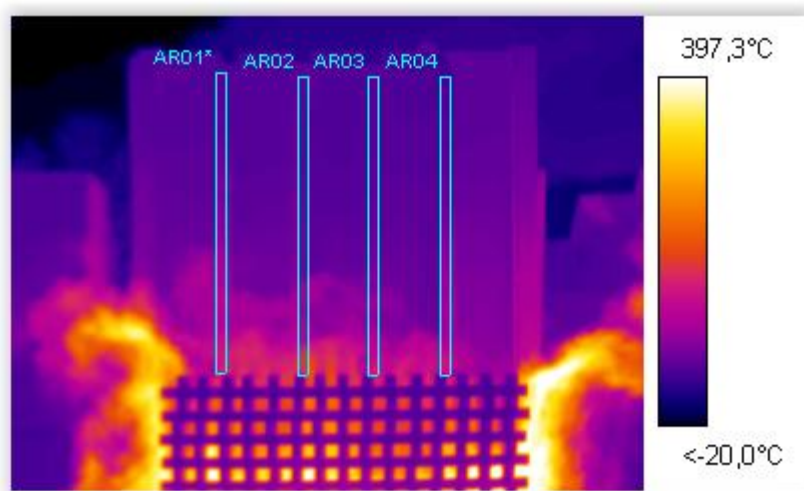
Ze względu na odwróconą numerację – oznaczenie elementów dla termogramów przedstawia poniżej legenda:

AR01 - element D (zabezpieczenie tkaniną z włókna szklanego szklaną tzw. kocówka),

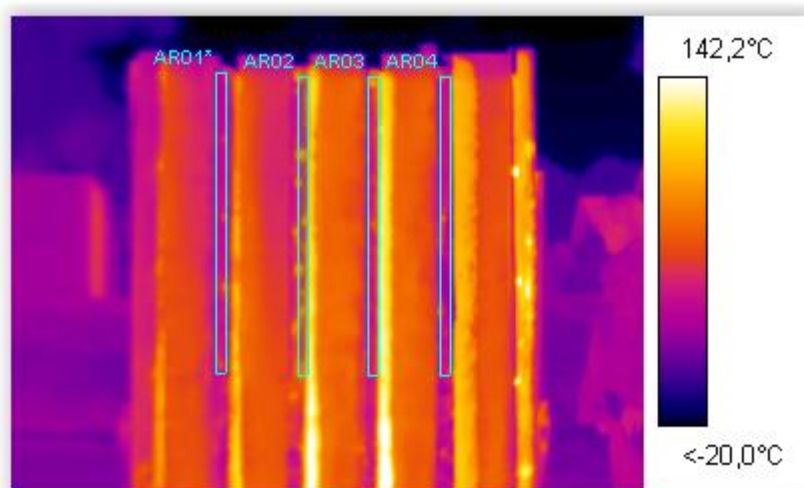
AR02- element C (zabezpieczenie tkaniną z włókna szklanego z modyfikacją wermikulitem),

AR03 - element B Świadek,

AR04 - element A (zabezpieczenie tkaniną z włókna szklanego z modyfikacją płatkami aluminium).



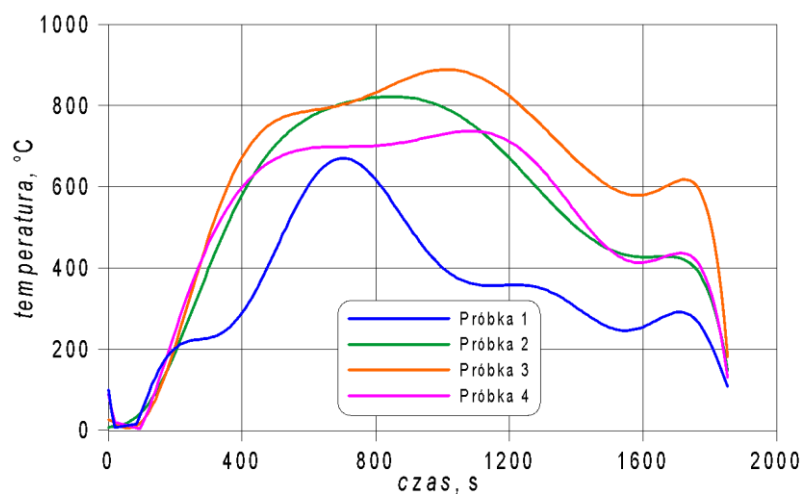
Rysunek 70. Termogram z zaznaczonymi analizowanymi polami termicznymi do czasu zapadnięcia stosu palącego się drewna



Rysunek 71. Termogram z zaznaczonymi analizowanymi polami termicznymi po zapadnięciu stosu z palącego się drewna.

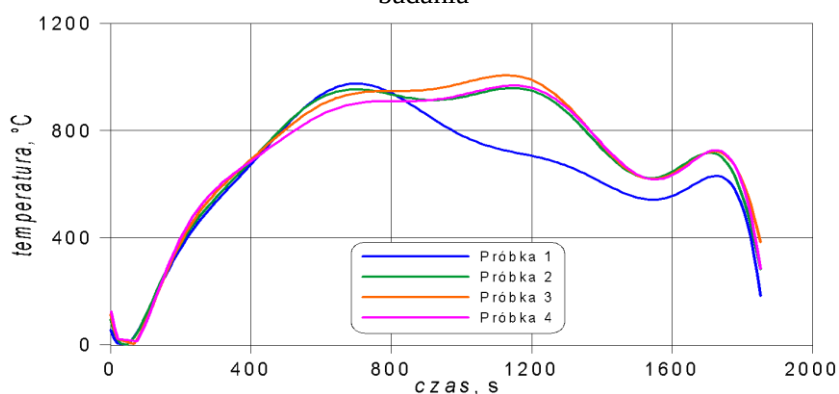
Wynikiem zapisu termogramów w interwale czasowym co 1s i ich analizy są wykresy poniżej. Celowo zastosowano porównanie oraz wizualizacją danych zakresów min i max dla każdego materiału w celu dokładnej analizy uzyskanych wartości.

Wykres 28. Średnia temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania



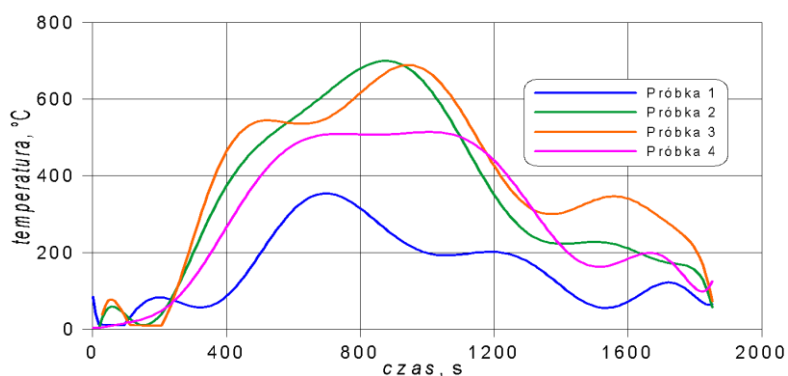
Źródło: Opracowanie własne

Wykres 29. Maksymalna temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania



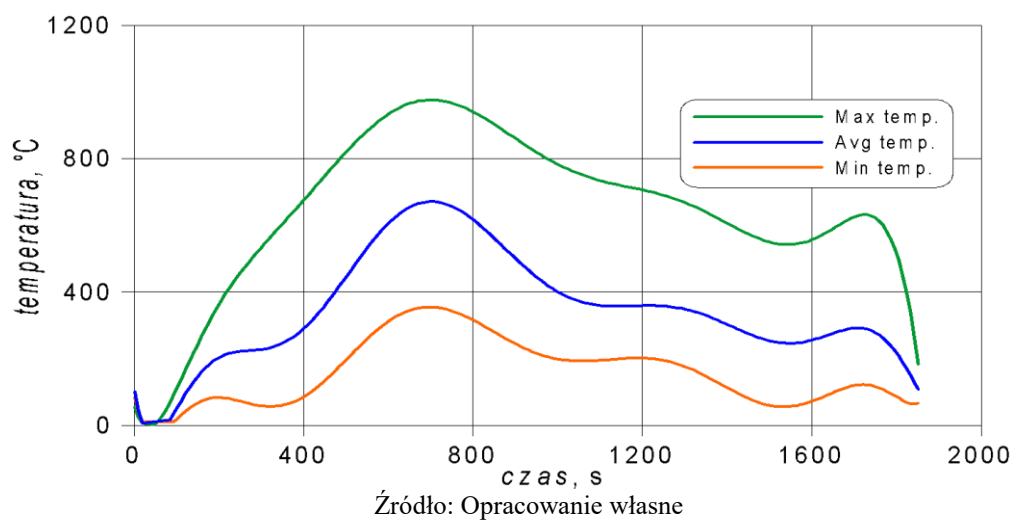
Źródło: Opracowanie własne

Wykres 30. Minimalna temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania

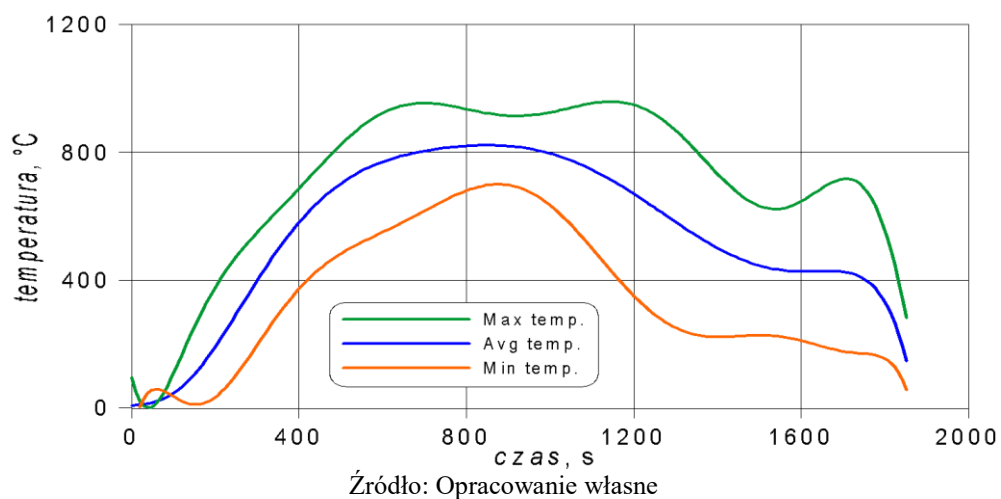


Źródło: Opracowanie własne

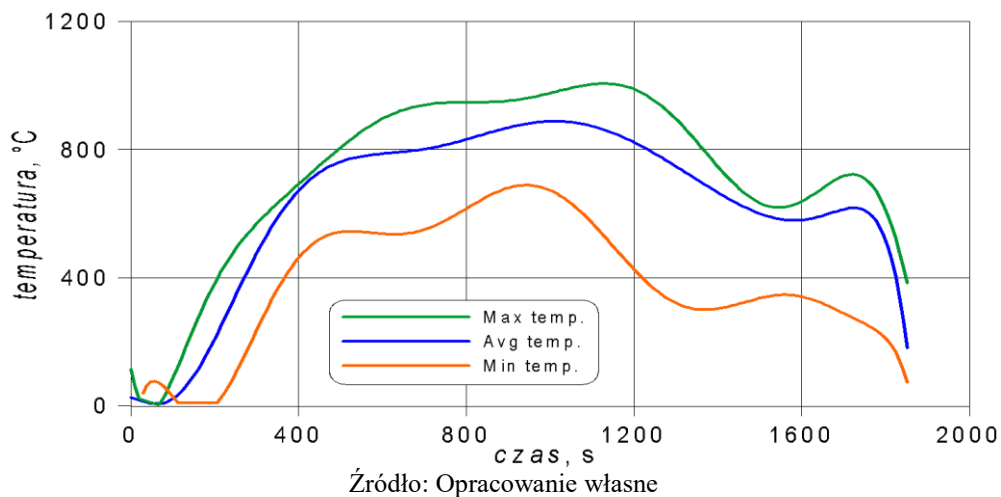
Wykres 31. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 1



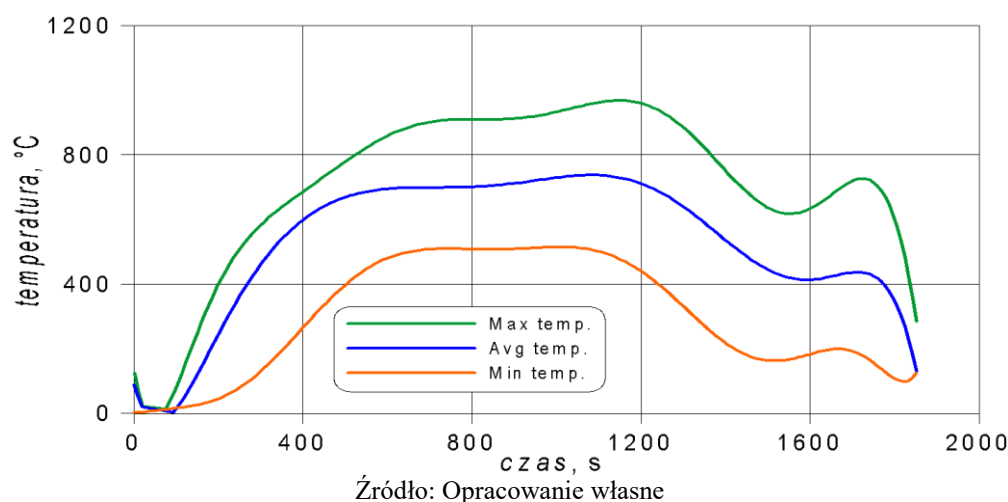
Wykres 32. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 2



Wykres 33. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 3



Wykres 34. Charakterystyka temperaturowa próbki nr 4



Analizując wykresy termogramów oraz dane z termopar, obserwujemy pozytywny wpływ materiałów osłonowych wykonanych z włókna szklanego na zmniejszenie szybkości nagrzewania się elementów drewnianych, co jest bezpośrednio powiązane z opóźnieniem procesów piroliz i zmianami strukturą materiału zabezpieczanego.

Istotną obserwacją jest analiza próbki 1. (element osłonięty tkaniną o gramaturze 560 g/m²). Zmierzone niższe temperatury w punktach pomiarowych w stosunku do pozostałych próbek są spójne z danymi termowizyjnymi. Niższe temperatury mogą wynikać z lokalnych zaburzeń przepływu powietrza w trakcie ekspozycji w obszarze powyżej osłony bocznej, a próbka 1. umieszczona była na stronie nawietrzanej, co mogło łącznie wpłynąć na lokalnie niższe temperatury. Obserwacja ta powinna być brana pod uwagę w końcowej ocenie głębokości zwęglenia dla próbki 1. oraz w porównaniu efektywności materiałów, jako parametry niepewności pomiaru.

Analizując próbki nr 2, 3 i 4, obserwujemy porównywalne zakresy temperatur minimalnych i maksymalnych, co potwierdzają porównywalne warunki graniczne dla tych elementów.

Pomimo zbliżonych temperatur mierzonych na powierzchni drewna (przed materiałem osłonowym), temperatury zarejestrowane w punktach wewnętrznych dla materiałów wermikulitowego i aluminiowego wykazują obniżenie temperatury o około 100°C w obszarze stosu testowego, reprezentujący znaczący parametr dla oceny efektywności ochrony termicznej.

8.5.3. Ocena stanu tkanin w trakcie badania i po próbie

Ważnym aspektem oceny skuteczności materiałów osłonowych dla elementów drewnianych jest zachowanie się materiałów osłonowych w warunkach rzeczywistego pożaru. Uszkodzenia i stan tkanin w trakcie próby laboratoryjnej opisane zostały w rozdziale 7. Zachowanie materiałów w próbie poligonowej wykazywało znacznie większą dynamikę zmian i degradacji.

Analiza stanu materiałów osłonowych podzielona została na dwie fazy: zmiany obserwowane w trakcie ekspozycji termicznej oraz po jej zakończeniu.

Pierwsza faza - przebieg zmian w trakcie ekspozycji termicznej

W porównaniu z badaniami laboratoryjnymi, pierwsza faza wykazywała znacznie większą dynamikę procesów degradacji. Najwcześniejsze zmiany wizualne zaobserwowano dla materiałów wermikulitowego i aluminiowego. W obu materiałach obserwowano szybkie zmiany zabarwienia. Jednak nie wpłynęło to w tej fazie na utratę strukturalnej ciągłości materiałów.

Przebieg degradacji w poszczególnych materiałach

Najwcześniej utrata ciągłości materiału obserwowana została w powłoce aluminiowej, po około 12 minutach ekspozycji. Po około 15 minutach obserwowano podobne uszkodzenia w próbce D (materiał gramatura 530 g/m²). Najpóźniej proces degradacji obserwowano w materiale wermikulitowym, pomimo wczesnych zmian zabarwienia.

Spalanie płomieniowe na powierzchni materiałów

Ważnym aspektem procesu było spalanie płomieniowe na powierzchni materiałów. Dla próbek D (włókno 530 g/m²) i C (wermikulit) proces spalania przebiegał łagodnie, z ograniczonym płomieniem na powierzchni. Spalanie było kontrolowane, sporadycznie płomień uwidaczniał się powyżej powierzchni materiału, między elementem drewnianym a osłoną.

Spadanie płomieniowe w powłoce aluminiowej- zjawisko anomalne

Proces ten przebiegał całkowicie inaczej dla próbki 1. (powłoka aluminiowa). Po zaledwie kilku minutach ekspozycji obserwowano intensywne wydzielanie produktów rozkładu między powłoką a elementem drewnianym, rozprzestrzeniające się w górę. Po

czasie około 6 minut 20 sekund obserwowano zapalenie się wydzielanych frakcji gazowych w sposób gwałtowny i intensywny.

Na podstawie charakteru spalania można wnioskować, że nie jest to spalanie laminarne, lecz spalanie produktów gazowych wydzielających się pod ciśnieniem. Zjawisko to wskazuje na ograniczoną przepuszczalność gazową struktury materiału osłonowego.

Gwałtowne wydzielania produktów pirolizy

Dalsze obserwacje ujawniły dodatkowe zjawiska niezaobserwowane w pozostałych konfiguracjach materiałowych, takie jak gwałtowne wydzielanie produktów pirolizy poprzez lokalne rozerwanie się powłoki osłonowej i odrzucenie fragmentów o powierzchni około 30 cm². Zjawisko to zaobserwowano dwukrotnie w różnych fazach ekspozycji termicznej.

Druga faza – stan materiałów po zapadnięciu stosu testowego

Po zapadnięciu pożaru testowego uwidoczniły się wcześniej niedostępne obszary. W tym obszarze widoczny był znaczący poziom degradacji osłony z aluminium. Od strony eksponowanej praktycznie całkowita utrata powłoki osłonowej, jedynie śladowe ilości zachowały się na ścianach bocznych.

Najmniejszą degradację obserwowano w materiale wermikulitowym, jednak zauważalne były ubytki w powłoce osłonowej.



Rysunek 72. Zdjęcie po lewej - widoczne uszkodzenie powłoki element D i C; zdjęcie po prawej - uszkodzenie powłoki element A

Kolejna ocena stanu powłok zabezpieczających została wykonana tuż przed rozpoczęciem gaszenia i po wstępnym przechłodzeniu ściany, aby zachować układ uszkodzeń i ich zakres. Ponieważ ze względu na znaczne przemieszczenia ściany przed dalszą operacją demontażu istniała obawa o zatarcie części śladów i zmiany ich oryginalnego układu.



Rysunek 73. Uszkodzenia powłok zabezpieczających przed rozpoczęciem gaszenia czas 29'30''



Rysunek 74. Stan ściany po zakończeniu badania oraz przechłodzeniu ściany do temp. 30°C

Wstępna analiza po zakończeniu próby poligonowej wskazała na największe uszkodzenia powłoki w obrębie elementu A. Do wysokości ok. 90 cm powłoka praktycznie przestała istnieć jedynie niewielkich skrawki na ściankach bocznych



Rysunek 75. Uszkodzenia powłoki z natryskiem aluminium



Rysunek 76. Uszkodzenia powłoki z wermikulitem



Rysunek 77. Uszkodzenia powłoki włókno szklane tzw. kocówka

Dla porównania dla zarejestrowanych uszkodzeń w zakresie powłok zabezpieczających oraz częściowo widoczne zwęglenia pod ubytkami materiałów osłonowych przedstawiono poniżej. Stan elementu drewnianego referencyjnego bez zabezpieczeń oraz zakres uszkodzeń struktury drewna.



Rysunek 78. Uszkodzenia próbki typu świadek bez zabezpieczeń

Szczegółowa analiza uszkodzeń powłok ochronnych została wykonana w kolejnym etapie tj. w trakcie demontowania poszczególnych elementów ściany testowej oraz dalej w laboratorium.

Po zdemontowaniu płyty GKF jako osłony deskowania przystąpiono do demontażu elementów drewnianych zabezpieczonych materiałami tekstylnymi oraz próbki świadek. W trakcie demontażu znaczna część materiałów osłonowych samoistnie odpadła, jedynie niewielkie ilości pozostały na ścianach bocznych. Po zabezpieczeniu tkanin dla każdej próbki przystąpiono do demontażu pozostałych elementów, a materiały poddano dokładnej analizie.



Rysunek 79. Stan ściany po demontażu osłon GKF

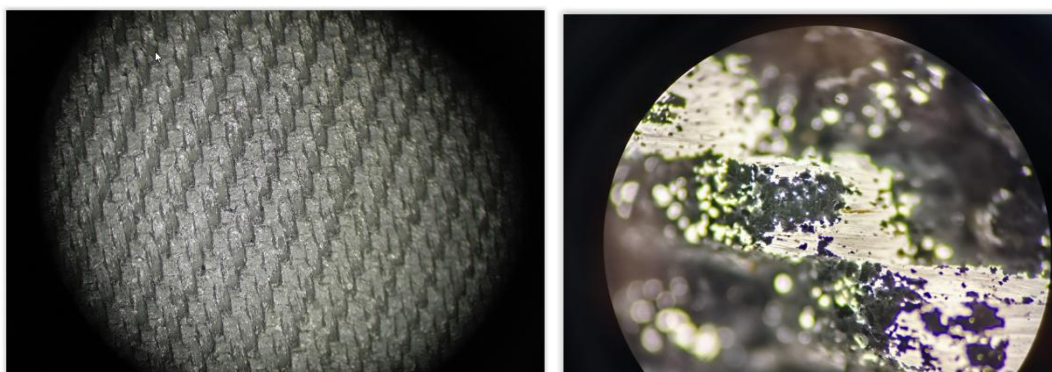
Analizę materiałów rozpoczęto od materiału z włókna szklanego z powłoką z płatków aluminium, czyli element A. Zastosowany materiał na całej długości uległ bardzo dużej destrukcji, niewielkie ilości materiału pozostały na ścianach bocznych przy miejscu, gdzie znajdowała się płyta GKF. W trakcie jej demontażu i innych operacji materiał samoistnie się wykruszał i odpadał. W żadnej części nie zespolił się z drewnem. Materiał bardzo kruchy, przebarwiony, brak możliwości wizualnego ustalenia, która strona była z powłoką modyfikowaną. Opisane uszkodzenia zaobserwowano na całej długości elementu, przed rozpoczęciem demontażu ubytki materiału na długości sumarycznej ok. 70 cm. Są to elementy, które w trakcie próby odpryskiwały i były rozrywane przez gazy pożarowe, co opisano w czasie przebiegu próby poligonowej.



Rysunek 80. Pozostałości powłoki z modyfikacją aluminium po zdemontowaniu płyty GKF między elementami



Rysunek 81. Pozostałości powłoki z modyfikacją aluminium po zdemontowaniu z zabezpieczonego elementu



Rysunek 82. Materiał z powłoką aluminium zdjęcie przed badaniem

Kolejną powłoką, którą poddano analizie, jest włókno szklane z modyfikacją wermikulitem. Ten materiał osłonowy w znacznie większym zakresie pozostał na zabezpieczonym elemencie, jednak w trakcie demontażu osłon jw. odpadał samoistnie głównie w dolnej części do wysokości ok. 1 m od podstawy. Przed wykruszeniem zachowywał pierwotny kształt zabezpieczonego elementu. W czasie demontażu osłona

pękała na duże kawałki. Całość materiału w pełni przebarwiona z dużym nagromadzeniem sadzy w strukturze. Ponadto, co nie było tak wyraźne w pozostałych dwóch osłonach, w sposób znaczący zmniejszyła się grubość materiału.

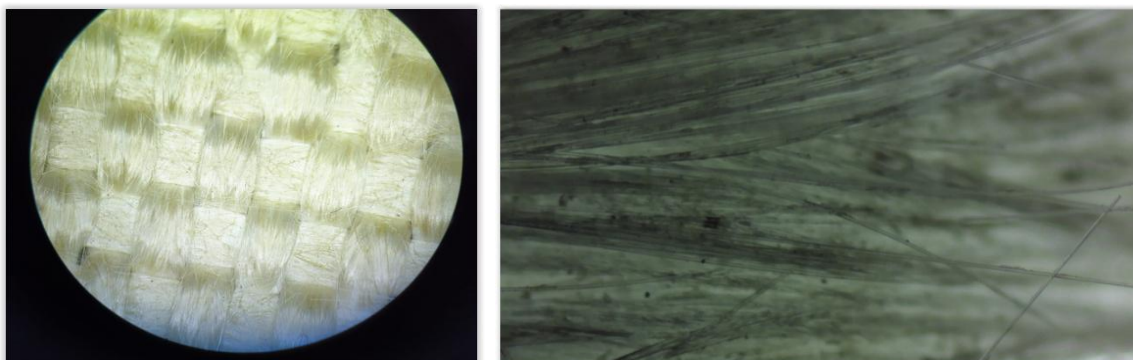


Rysunek 83. Pozostałości powłoki z modyfikacją wermikulitem po zdemontowaniu płyty GKF między elementami

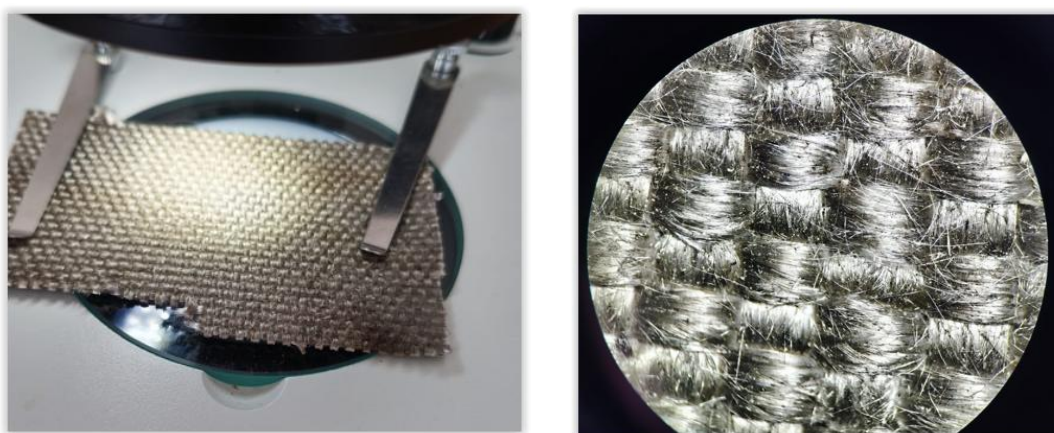


Rysunek 84. Pozostałości osłony z modyfikacją wermikulitem po zdemontowaniu

Podczas badań laboratoryjnych na włóknach zaobserwowano duże nagromadzenie drobinek sadzy. Związane jest to najprawdopodobniej ze strukturą tego materiału, ma on luźniejszy splot, a włókno jest bardziej „zmechacone” w stanie podstawowym.



Rysunek 85. Tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem przed próbą poligonową



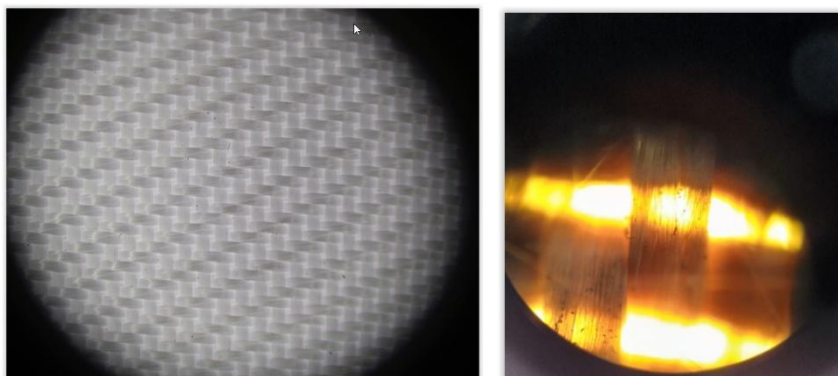
Rysunek 86. Tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem po próbie poligonowej

Ostatnią analizowaną powłoką jest włókno szklane niemodyfikowane o gramaturze 560 g/m^2 . Podobnie jak poprzednie materiały uległ znacznemu uszkodzeniu, materiał przed usunięciem z próbki drewna zachował pierwotny kształt zabezpieczanego elementu. Niewielkie ubytki materiału na całej długości, pęknięcie na narożach materiału zabezpieczanego. Pozostałości materiału są bardziej elastyczne niż dwa pozostałe



Rysunek 87. Pozostałości powłoki z włókna szklanego gramatura 560 g/m^2

materiały, częściowo musiał zostać wycięty w odróżnieniu od poprzednich, które samoistnie się wykruszały.



Rysunek 88. Tkanina szklana bez modyfikacji zdjęcie po lewej przed próbą po prawej po próbie poligonowej

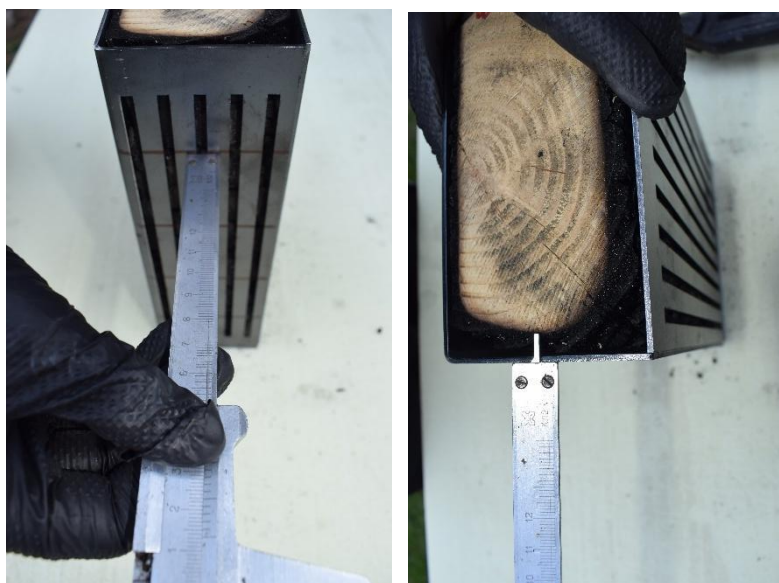
Na podstawie obserwacji zdjęcia powyżej stwierdzono, że włókno po badaniu posiada nieznaczną ilość nagromadzonych cząsteczek sadzy, widać lekkie przebarwienie, jednak kolor na zdjęciu po badaniu głównie pochodzi od podświetlenia w czasie przygotowywania zdjęcia. Struktura materiału nie została zmieniona, można zauważyć pojedyncze włókna tworzące materiał. W odróżnieniu od powłoki z modyfikacją wermikulitem nie nastąpiło postrzępienie - zmechanienie włókien.



Rysunek 89. Powłoka zabezpieczająca po zdemontowaniu z elementu drewnianego

8.5.3 Ocena uszkodzeń drewna - przebarwienia, zwęglenie, rozkład uszkodzeń

Zasadniczym elementem badań czy to laboratoryjnych czy poligonowych było określenie wpływu materiałów technicznych na bazie włókna szklanego w zakresie przydatności w ochronie elementów drewnianych w warunkach pożaru. Podstawowy parametr to głębokość prędkość zwęglania. Wykonana analiza porównawcza została przeprowadzona dla każdego elementu. Przed końcowym badaniem głębokości zwęglenia każdy element został pocięty na odcinki o długości 25 cm. Ten zabieg miał na celu ułatwienie globalnej oceny uszkodzeń danego elementu. Pomiar głębokości zwęglania wykonywany był w czterech powtarzalnych punktach dla każdego odcinka,



Rysunek 90. Wykorzystanie szablonu do pomiaru głębokości zwęglania.

z wykorzystaniem szablonu zapewniającego powtarzalność warunków pomiarowych. Pomiar wykonywany jest od czoła próbki. W pomiarach głębokości zwęglenia uwzględniono grubość ścianek szablonu. Wszystkie cztery belki miały identyczny wymiar (z wyłączeniem parametru szerokości, gdzie różnica sięgała +/- 1 mm, jednak nie analizowano głębokości zwęglenia na ściankach bocznych), co zostało potwierdzone przed montażem elementów na ścianie, a co skutkuje pominięciem różnic w wymiarach między elementami.

Poniżej przedstawiono zakres uszkodzeń poszczególnych elementów drewnianych. Widoczny dla części próbek biały pasek przy podstawie to masa pęczniąca wykorzystana do zminimalizowania wpływu nierówności materiału i przylegającej osłony z płyty GKF. W trakcie pomiarów masa została usunięta. Numeracja próbek zaczyna się od podstawy, oznaczenie próbki na górnym fragmencie odcinka.



Rysunek 91. Uszkodzenie elementu drewnianego „świadek”

Na podstawie obserwacji na zdjęciu powyżej największe głębokości zwęglania dla tego elementu występują na odcinku 0 - 100 cm. Dotyczy to i ściany frontowej jak i ścian bocznych. Bardzo dobrze widoczne uszkodzenia krawędzi elementu, na co została zwrócona uwaga w procedurze obliczania przekroju dyspozycyjnego w Eurokodzie 5 część 1 - 2. Należy podkreślić, że czym wyżej - zakres uszkodzeń mniejszy, co pokrywa się z zarejestrowanymi temperaturami w trakcie badania. Przy dokładnej analizie możemy zaobserwować lokalnie większe głębokości zwęglania w miejscach wstępowania szczelin radiacyjnych. Natomiast w miejscach lokalnej zmiany gęstości tj. występowanie sęków te zmiany są mniejsze, co potwierdzają badania innych badaczy i cytowane wyniki w części teoretycznej. Zmiana głębokości zwęglania następuje liniowo, nie widać na poszczególnych odcinkach skokowej zmiany. Przedstawiony element posiada największe uszkodzenia w wyniku pożaru testowego.

Kolejnym elementem poddanym badaniu był element A zabezpieczony powłoką z włókna szklanego z modyfikacją płatkami aluminium. Był to materiał o najmniejszej grubości wykorzystany do zabezpieczenia elementu drewnianego w próbie poligonowej. W trakcie ekspozycji czynników pożarowych ulegał on rozerwaniu w kilku miejscach i

dlatego na załączonym w dalszej części opracowania wykresie głębokości zwęglania pojawiają się dla tego materiału lokalne zmiany zmierzonej głębokości.



Rysunek 92. Uszkodzenie elementu drewnianego zabezpieczonego tkaniną szklaną z powłoką aluminium

Dodatkowo w ostatniej próbce (na zdjęciu powyżej dolny rząd po lewo) górna powierzchnia posiada tylko minimalne zmiany w kolorze zewnętrznej powierzchni najprawdopodobniej spowodowane opisywanym spalaniem odparowanych produktów pirolizy powyżej materiału, w odróżnieniu od próbki świadek, gdzie niezabezpieczona górna część uległa bardzo znaczącemu procesowi degradacji termicznej. Warto zauważyć, że ten element nie był podstawą zakresu analizy, jednak widoczna różnica warta jest wskazania. Taka znikoma ilość uszkodzeń na zewnętrznej powłoce próbki wskazuje na bardzo pozytywny efekt przy działaniu niższych temperatury. Dlatego przydatność tego materiału w dalszej odległości od ogniska pożaru będzie miała znaczący wpływ na redukcję głębokości zwęglania. Jest to analogia do prób laboratoryjnych, gdzie uzyskiwano niższe temperatury i efekt izolacji był tam bardziej widoczny.

Kolejny analizowany element zabezpieczony był włóknem szklanym z modyfikacją wermikulitem. Widoczny zakres uszkodzeń przedstawia się podobnie jak w przypadku powłoki aluminium. W tej próbce na lokalne głębokości zwęgleń może mieć wpływ większa ilość szczelin radiacyjnych sięgających do rdzenia próbki. Jednak w

ujęciu globalnym próbka w znacznie mniejszym stopniu uległa uszkodzeniu termicznemu niż próbka świadek. Analizując układ słoików i odległość między nimi, są bardzo zbliżone do próbki świadek, zatem wartość porównawcza jest tutaj znacznie większa.

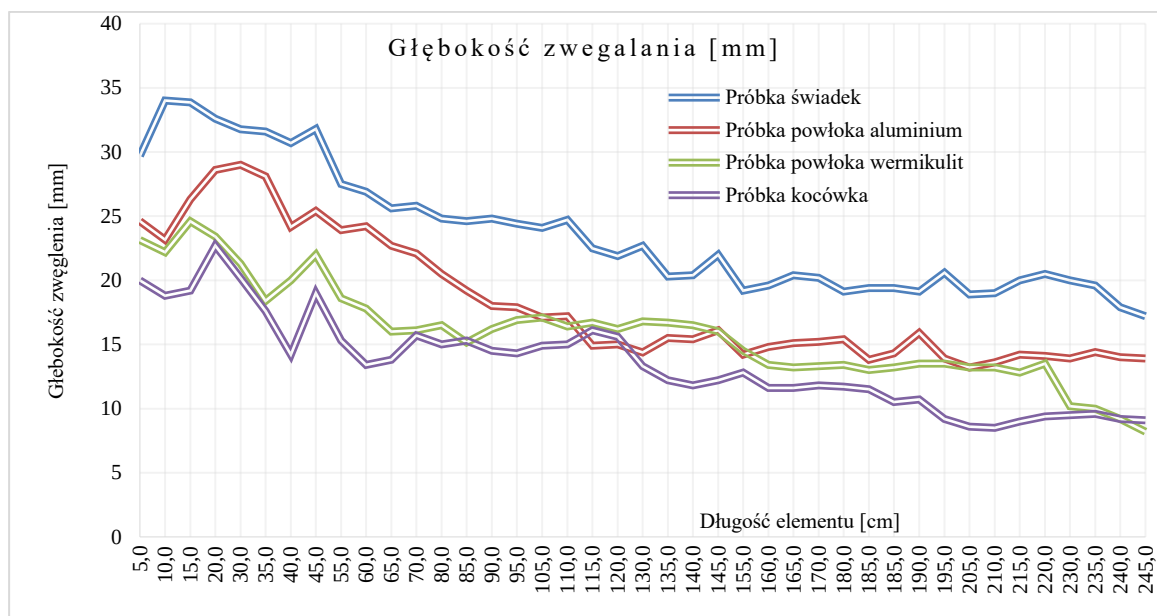


Rysunek 93. Uszkodzenie elementu drewnianego zabezpieczonego włóknem szklanym z modyfikacją wermikulitem

Ostatnim elementem analizowanym pod kątem głębokości zwęglania to element zabezpieczony włóknem szklanym o gramaturze 560 g/m^2 . Jak zostało to już opisane w części związanej z analiza temperaturową w czasie próby poligonowej, uzyskane temperatury wewnątrz elementu w punktach pomiarowych i na zewnętrznej były niższe od pozostałych elementów, co potwierdziło uśrednione wartości z termogramów. Zakres uszkodzeń jest znacznie mniejszy niż w dwóch opisanych wcześniej materiałach. Lokalizacja materiału od strony nawietrznej mimo zastosowania osłon wiatrowych miało wpływ na rozkład temperatur w tym elemencie. Ale biorąc pod uwagę ten fakt element w znacznym stopniu zachował pierwotny przekrój, mając za względzie zapis temperatur zewnętrznych na podstawie termogramu dla próbki nr 1 (opis wg termogramów), element wystawiony był na temperatury w przedziale $800 - 900^\circ\text{C}$ przez czas ok. 400s. Więc wpływ warunków pożarowych na element był i to nie tylko okazjonalnie, w trakcie zasadniczej części testu element był narażony na temperatury ciągle w przedziale ok. $400 - 500^\circ\text{C}$ w czasie ok. 800 s.

Końcowym efektem badań poligonowych jest porównanie głębokości zwęglania w przedziale czasu i wysokości elementu dla danych elementów.

Wykres 35. Głębokość zwęglania poszczególnych badanych elementów



Źródło: Opracowanie własne na podstawie badania poligonowego

Tabela 15. Głębokości zwęglania w rozbiściu na elementy badawcze

Wysokość elementu [cm]	Próbka świadek	Próbka powłoka aluminium	Próbka powłoka wermikulit	Włókno szklane typu kocówka
5	29,7	24,6	23,14	20
10	34,01	23,15	22,2	18,8
15	33,86	26,3	24,6	19,2
20	32,6	28,6	23,4	22,7
30	31,78	29	21,3	20,17
35	31,6	28,1	18,4	17,6
40	30,7	24,17	20	14,2
45	31,8	25,4	22	19
55	27,5	23,9	18,6	15,3
60	26,9	24,2	17,8	13,4
65	25,6	22,7	16	13,8
70	25,8	22,1	16,1	15,7
80	24,8	20,5	16,5	15
85	24,6	19,2	15,15	15,3
90	24,8	18	16,2	14,5
95	24,4	17,9	16,9	14,3
105	24,08	17,1	17,1	14,9
110	24,7	17,2	16,4	15
115	22,5	14,9	16,7	16,1
120	21,9	15	16,2	15,6
130	22,7	14,38	16,8	13,3
135	20,3	15,5	16,7	12,2
140	20,4	15,4	16,5	11,8
145	22	16,1	16,02	12,2
155	19,2	14,2	14,5	12,8
160	19,6	14,8	13,4	11,6

Wysokość elementu [cm]	Próbka świadek	Próbka powłoka aluminium	Próbka powłoka wermikulit	Włókno szklane typu kocówka
165	20,4	15,1	13,2	11,6
170	20,2	15,2	13,3	11,8
180	19,13	15,4	13,4	11,7
185	19,4	13,8	13	11,5
185	19,4	14,3	13,2	10,5
190	19,11	15,9	13,5	10,7
195	20,6	13,9	13,5	9,2
205	18,9	13,2	13,2	8,6
210	19	13,6	13,2	8,5
215	20	14,2	12,8	9
220	20,5	14,1	13,5	9,4
230	20	13,9	10,2	9,5
235	19,6	14,4	10	9,6
240	17,9	14	9,2	9,2
245	17,2	13,9	8,2	9,1
Średnia	23,64	18,23	15,90	13,52

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie obserwacji stwierdzono, że każdy z zastosowanych materiałów posiada pozytywny wpływ na redukcję szybkości-głębokości zwęglenia zabezpieczanego materiału. Warto zauważyć, że każdy z zastosowanych materiałów ma swoje wady i zalety ujawniające się w czasie badań, jednak średnia wartość osłabienia, głębokość zwęglenia zawiera się w przedziale od 7,7 - 5,4 mm. W tym przedziale nie uwzględniano materiału typu kocówka z opisanych wcześniej przyczyn, jednak jego pozytywne walory określone w trakcie badań poligonowych i laboratoryjnych dają duży potencjał do dalszych analiz.

8.6. Analiza wyników badań poligonowych

Rozdział ósmy dokumentuje badania poligonowe przeprowadzone w skali naturalnej, stanowiące etap weryfikacji wyników uzyskanych wcześniej na stanowiskach laboratoryjnych z promiennikami podczerwieni i otwartym płomieniem. Badania poligonowe zostały zrealizowane w otwartej przestrzeni na terenie Poligonu Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie w dniu 2.03.2026. Przygotowanie całego stanowiska zrealizował autor. Ze względów technicznych, konieczności obsługi aparatury i zabezpieczenia przeciwpożarowego prowadzonych badań w trakcie próby obecni byli na miejscu: dr inż. Robert Marcin Wolański - obserwator przebiegu badania, dr Jan Giełżecki obsługa sprzętu do zapisu termowizyjnego, kdt. Mateusz Kowalczyk - zapis multimedialny, st. kpt. inż. Marek Piątek - zabezpieczenie przeciwpożarowe.

Cel i uzasadnienie przejścia do skali makro

Podstawowym celem badania poligonowego było zweryfikowanie hipotezy roboczej dotyczącej skuteczności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako osłon termicznych w warunkach zbliżonych do rzeczywistego pożaru. Rozwiązanie laboratoryjne z kontrolowanymi źródłami ciepła, choć umożliwia precyzyjny pomiar profili termicznych i głębokości zwęglania, nie odwzorowuje w pełni dynamiki pożaru rzeczywistego zmienności natężenia i rozkładu temperatury w funkcji czasu, konwekcji gazów pożarowych ani efektów wielokierunkowego oddziaływania termicznego na chronione elementy drewniane. W związku z powyższym przejście do skali naturalnej stanowiło naturalną i niezbędną część strategii badawczej.

Badanie poligonowe należało również do grupy zadań mających na celu ocenę zachowania się tkanin technicznych w rzeczywistych warunkach ekspozycji termicznej, obserwację ich uszkodzeń, deformacji, fragmentacji i ewentualnej utraty właściwości izolacyjnych na skutek działania pożaru. Informacje na temat zmian materiałowych warstwy ochronnej są istotne dla prognozowania jej długotrwałości i potencjalnego zastosowania w praktyce inżynierskiej.

Analiza wykonana została kilkietapowo tj: monitorowanie zmian temperatury w czasie badania oraz zjawisk zachodzących w trakcie próby, oceny uszkodzeń i zmian tkanin technicznych jak i samych elementów drewnianych.

Wykonane analizy dały materiał o mocnych podstawach, wskazując analogicznie jak w testach laboratoryjnych pozytywny wpływ na redukcję szybkości zwęglania materiałów zabezpieczonych tkaninami szklanymi surowymi i z modyfikacjami. Wykonany test poligonowy dał też wnioski dla przyszłych prób wskazujące na ewentualne utrudnienia, ale i też określające możliwe warunki brzegowe wykonania tego typu testu w otwartych warunkach terenowych.

Źródła niepewności i ograniczenia badań poligonowych

Badanie poligonowe obciążone było szeregiem źródeł niepewności wymagających dodatkowego omówienia. Przede wszystkim dynamika pożaru, wzrost i spadek intensywności spalania nie mogły być w pełni kontrolowane, co prowadzi do naturalnej zmienności profilu temperaturowego.

Drugą istotną niepewnością było oddziaływanie warunków pogodowych: słabe podmuchy incydentalne wiatru ingerowały w rozkład dymu i gazów pożarowych wokół ściany badawczej, potencjalnie wpływając na lokalny profil termiczny. Pomiary wykonane za pomocą anemometru wykazały przepływ powietrza na poziomie 0,8 - 1m/s w trakcie badań, co mogło powodować asymetryczne ochładzanie warstw ochronnych i nierównomierne rozprowadzenie ciepła. Fakt ten stanowi źródło rozbieżności między wariantami w różnych strefach ściany.

Trzecią kwestią jest precyzja pomiaru głębokości zwęglenia metodą suwmiarki, określenie dokładnej granicy zwęglonej i niezwęglonej drewna (naturalnego koloru) jest empirycznie trudne, szczególnie przy przejściu stopniowym barwy. W przyszłości warto rozważyć zastosowanie metod optycznych (skanিং przekrojów próbek) dla większej precyzji.

Czwartą niepewnością był rzeczywisty kontakt termiczny między tkaniną a drewnem, mimo pracownice wykonanego napięcia, w warunkach terenowych niemożliwe było zapewnienie identycznego naciągu i całkowitej eliminacji mikroprzestrzeni. Te przestrzenie mogły prowadzić do konwekcji bocznej gazów, która nie była reprezentowana w modelowaniu laboratoryjnym i stanowiła dodatkową ścieżkę transferu ciepła poza izolującą funkcją tkaniny.

Badania poligonowe potwierdziły w zasadzie kierunkowość hipotez laboratoryjnych, tkaniny techniczne na bazie włókna szklanego, szczególnie z funkcjonalnymi powłokami (aluminium, wermikulit), wykazują zdolność opóźniania zwęglenia drewna iglastego w warunkach ekspozycji termicznej. Efekt opóźnienia był najmocniejszy dla wariantu C (powłoka wermikulitowa) osiągającego redukcję głębokości zwęglenia na poziomie 45 - 50%, co stanowi wartość merytoryczną dla praktyki inżynierskiej.

ROZDZIAŁ 9. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TKANIN TECHNICZNYCH W OCHRONIE OBIEKTÓW Z KONSTRUKCJĄ DREWNIANĄ – OBIEKTY ZABYTKOWE, ZABEZPIECZENIA TYMCZASOWE PRZY PRACACH REMONTOWYCH ORAZ ETAP DOCHODZENIA DO PEŁNYCH WYMAGAŃ OCHRONY POŻAROWEJ

Niniejszy rozdział stanowi kontynuację badań laboratoryjnych i poligonowych (rozdziały 7 - 10) a dokładniej ich wyników, z praktyką stosowania wybranych tkanin technicznych w rzeczywistych warunkach budowlanych. Uwzględnia zarówno aspekty techniczne, jak i konserwatorskie stosowanie osłon tekstylnych w obiektach zabytkowych, nowych, a także tymczasowych zabezpieczeń podczas prac remontowych. Rozdział syntetyzuje doświadczenia z próby wdrożeniowej i formułuje rekomendacje dla praktyków: projektantów, konstruktorów, konserwatorów i inspektorów bezpieczeństwa pożarowego.

9.1 Typowe obiekty i elementy konstrukcyjne do zastosowania tkanin

Wieżby dachowe, zarówno w obiektach zabytkowych, jak i nowoczesnych, stanowią preferowane pole aplikacji osłon z tkanin technicznych. Uwarunkowania techniczne i pożarowe wynikają z następujących cech konstrukcyjnych.

Wieżby stanowią konstrukcje przestrzenne, w których elementy nośne - krokwie, wiązary, podciągi i słupy tworzą system trójwymiarowy. Dostęp do poszczególnych elementów jest ograniczony pod względem przestrzennym i bezpieczeństwa pracy na wysokości. Skomplikowana geometria wymaga indywidualnego podejścia do montażu osłon.

Elementy wieżby dachowej znajdują się w trudno dostępnych częściach obiektu. Nierzadko dostęp do części poddasza nieużytkowego odbywa się przez włazy, podesty techniczne czy wręcz wejście jest realizowane z lokali mieszkalnych czy użytkowych, co w znaczący sposób utrudnia szybkie i bezproblemowe dotarcie do tych elementów. W przypadku pożaru szansa na szybkie wykrycie zagrożenia (pomijamy tu systemu detekcji pożaru) i jego opanowanie w zarodku jest bardzo utrudnione, a często niemożliwe. Dotarcie też do tych elementów od zewnątrz obiektów, jak wskazuje doświadczenie autora w bezpośrednich działaniach gaśniczych, często jest utrudnione lub z racji

wysokości obiektu infrastruktury wokół niego czy po prostu zastawianych dróg pożarowych, we wczesnej fazie pożaru niemożliwe. Zatem osłona z tkaniny musi spełniać swoje funkcje bez możliwości interwencji zewnętrznej i wewnętrznej w pierwszych minutach rozwoju pożaru, stąd wynika wymaganie opóźnienia inicjacji zwęglenia drewna i dalszego rozwoju pożaru. Uzyskane pozytywne wyniki obniżenia szybkości zwęglania mogą pozwolić na wydłużenie tego ważnego okresu w rozwoju pożaru i dają możliwość podjęcia skutecznych działań jeszcze zanim pożar nie będzie mógł być już opanowany w sposób kontrolowany.

Wieże kościołów, obiekty monumentalne typu pałacowego, spichlerze i gmachy publiczne stanowią osobną kategorię obiektów ze względu na warunki dostępu, ukształtowanie architektoniczne i wymogi konserwatorskie. Prace w obrębie elementów drewnianych połaci dachowej wymagają stosowania zaawansowanego sprzętu alpinistycznego i asekuracyjnego. Często wykorzystanie innego sprzętu jak podnośniki, rusztowania jest utrudnione lub niemożliwe. Zatem bardzo duże znaczenie dla prac w takich obiektach ma jak największe obniżenie masy wykorzystywanych materiałów do wbudowania w obiekt. Operowanie stosunkowo lekkim i elastycznym materiałem, jakim są tkaniny techniczne na dużych wysokościach, ma znaczenie dla prowadzonych prac zabezpieczających pod kątem pożarowym. Wykorzystanie płyt czy innej formy w postaci kilkuwarstwowych natrysków znacząco utrudnia wykonanie prac, a nierzadko w ogóle je wyklucza.

Stropy drewniane zabytkowe i w adaptowanych obiektach to częsty element konstrukcji poddany zabiegom w trakcie remontów i adaptacji. Konieczność podwyższenia klasy odporności ogniowej bez zbytniego dociążenia konstrukcji to typowy problem projektowy, ale i też wykonawczy. Badane w ramach pracy osłony z wykorzystaniem materiałów jako samoistne elementy ochrony przeciwpożarowej dały pozytywne wyniki w zakresie zwiększenia poziomu ochrony zabezpieczanych elementów. Wykonane badania i analizy dotyczą osłony jednowarstwowej, ale potencjał materiałów daje możliwość wykorzystania ich w przegrodach czy systemach kombinowanych wielomateriałowych. Należy podkreślić, że jest to obszerne zagadnienie, ale wykonane badania dają potencjał do dalszej analizy i wdrożenia rozwiązań. Wykonywane przez autora inwestycje związane z zabezpieczeniami obiektów objętych ochroną konserwatorską wskazują na częsty problem, jakim jest brak wymaganej klasy odporności ogniowej, którą przedstawiają stropy z odległych okresów

historycznych. Brak dokumentacji i potwierdzonych parametrów pożarowych skłania inwestorów i projektantów do wymiany tych elementów na obecne ustroje budowlane, co w znaczący sposób kłóci się z oczekiwaniami służby konserwatorskiej. Podjęcie decyzji o pozostawieniu takich elementów bez dodatkowej ochrony zazwyczaj skutkuje wprowadzeniem innych rozwiązań zamiennych, ale przeważnie są to systemy techniczne zabezpieczeń przeciwpożarowych. Wzmacnianie stropów czy częściowa ich wymiana pociąga duży nakład pracy i finansowy, a często ograniczenia konstrukcyjne uniemożliwiają takie działania. Właśnie w takich sytuacjach zastosowanie tkanin technicznych jako część systemu kombinowanego w ujęciu nowatorskim może mieć zastosowanie.



Rysunek 94. Osiemnastowieczny strop drewniany, który z racji konieczności podwyższenia klasy odporności ogniowej musiał zostać zdemonstrowany.

Brak zgody na dodatkowe obciążenie statyczne konstrukcji. Ludmiła Olszowska

Wykorzystanie tkanin technicznych w takich sytuacjach nawet jako podejście tymczasowe w trakcie prac budowlanych może w znaczący sposób poprawić poziom ochrony w obiekcie.

9.2 Rekomendacje wdrożeniowe dla obiektów

Wykonane badania oraz analiza możliwości zastosowania tkanin technicznych w obiektach wskazują na kilka głównych obszarów zastosowań:

Wyniki testów poligonowych, w których materiał był ściśle aplikowany na elemencie zabezpieczanym, dają podstawy do wykonania takich zabezpieczeń w obiektach np. elementy konstrukcji więźby dachowej jak słupy, dźwigary czy elementy

jak miecze czy stężenia dla elementów drewnianych. Aplikacja w postaci obłożenia, osłonięcia elementu z dopasowanym rozwiązaniem montażowym do lokalizacji.

Warto zauważyć, że sposób aplikacji przez ścisłe obłożenie nie jest jedynym rozwiązaniem. Może to wynikać z problemów technicznych, jakim jest dokładna implementacja tkaniny na zabezpieczanym elemencie. Jest to istotny problem we wszystkich zabezpieczeniach biernych choć w zakresie tkanin ma on mniejszy poziom trudności. Zastosowanie tkaniny jako bariery przestrzennej np. skomplikowanego połączenia ciesielskiego lub ciasnej przestrzeni np. górna części konstrukcji wieży, może wymuszać konieczność zastosowania tkaniny jako zabezpieczenia przestrzennego, co w innych systemach jest praktycznie niespotykane z różnych względów.

Kolejny obszar zastosowania to aplikacja lokalna, miejsc szczególnie ważnych jak zbliżenia instalacji, bliskości urządzeń technicznych obiektu. Obszar do zastosowań to też lokalne miejsca połączenia konstrukcji drewnianej, w której naturalnie z racji procesów zachodzących w drewnie występują szczeliny rozwarstwienia czy lokalne zmiany np. przez konieczność zastosowania łączników. Elastyczny materiał umożliwia bez większych problemów zabezpieczenie takiego miejsca z minimalną ilością odpadów materiałowych.

Inny obszar zastosowania tkanin to przegrody przestrzenne. Jest on zbliżony do obecnych kurtyn dymowych i kurtyn przeciwpożarowych np. przed wejściem do kabin windowych. Jednak obecnie są to elementy stosowane tylko czasowo (po wystereowaniu lub uruchomieniu ręcznym), sterowane z systemu sygnalizacji pożaru czy innej automatyki pożarowej. Nowy obszar jako rozwiązanie zamienne może być stosowany jako trwała przegroda np. w częściach poddaszy nieużytkowych, zapewniając, w znaczny sposób ograniczenie rozprzestrzeniania się dymu i gazów pożarowych dając możliwość ograniczenia oddziaływania pożaru we wczesnej jego fazie tylko do części przestrzeni - konstrukcji. Utrudnione prowadzenie działań gaśniczych w tym obszarze to: ograniczenie dostępu, widoczności i zazwyczaj nagromadzenia materiałów palnych niebędących częścią konstrukcji. Elastyczna przegroda dzieląca przestrzeń np. strychu, poddasza nieużytkowego dzieli go na strefy - sektory z możliwością komunikacji między nimi i prowadzenia skutecznych działań gaśniczych czy działań w obronie. Przytaczany już w tej pracy pożar katedry Notre Dame naocznie wskazał na ten problem. Doniesienia medialne oraz zapisy wideo z tego pożaru dały rzeczywiste przykłady utrudnień a wręcz

niemożności prowadzenia skutecznych działań gaśniczych w przestrzeniach kubaturowych skomplikowanej konstrukcji dachowej.

Ważnym elementem każdego systemu biernej ochrony przeciwpożarowej w postaci płyt, natrysków na siatce itp. jest sposób mocowania danego elementu. Niska masa własna badanych materiałów oraz ich elastyczność daje możliwość szerokiego wachlarza możliwych do wykorzystania systemów zamocowań. Począwszy od prostych, jak zszywki tapicerskie, uchwyty i mocowania aplikowane ręcznie, po uchwyty dedykowane do osadzaków gazowych i prochowych. Należy podkreślić, że wspomniane metody w różnym stopniu ingerują w strukturę drewna: od znikomego wpływu, jak zszywki tapicerskie, po uchwyty wbijane automatycznie, które bez wątpienia wprowadzają lokalne zmiany wizualne w materiale. Jednak są to niewielkie zmiany w porównaniu z ingerencją w postaci mocowania ciężkich osłon bezpośrednio do elementów drewnianych czy przez podkonstrukcję. Przy mniejszych rozpiętościach lub przy zastosowaniu kombinowanego rozwiązania w zakresie mocowania, możliwe jest zastosowanie lin stalowych jako elementu nośnego od strony zabezpieczanego elementu. Taki układ pozwala zakotwić punkty mocujące w stałych elementach, jak murowane ściany szczytowe czy inne elementy murowe bez ingerencji w zabezpieczane elementy drewniane. Takie rozwiązanie daje duże możliwości adaptacyjne w istniejących obiektach oraz w sytuacji braku zgody na znaczącą ingerencję w zabezpieczony element.

Innym obszarem realnego wykorzystania tkanin technicznych w ochronie przeciwpożarowej jest ich zastosowanie do ochrony elementów niekonstrukcyjnych. Dotyczy to elementów, których nie można wcześniej w inny sposób zabezpieczyć, jak ołtarze, organy, dzieła sztuki trwale związane z obiektem. Wcześniejsze przygotowanie osłon i zdeponowanie ich w obiekcie, gdzie mogą w sposób szybki być zastosowane czy to przez obsługę obiektu czy służby ratownicze, daje realną poprawę poziomu bezpieczeństwa pożarowego dla tych przedmiotów czy elementów. Problem nabiera nowego znaczenia w dobie licznych konfliktów zbrojnych, gdzie szeroka ewakuacja mienia na wypadek pożaru jest utrudniona logistycznie.

Zabezpieczenie elementów drewnianych czy innych palnych o znacznej wartości czy to materialnej czy historycznej napotyka też na inne problemy. Produkty spalania w postaci gazów pożarowych, drobinek sadzy czy innych zanieczyszczeń wpływają na degradację materiałów, z którymi miały kontakt. Nie tylko ograniczenie prędkości

zwęglania dla drewna i materiałów drewnopochodnych, ale i też, co często może nawet być ważniejsze dla wartościowych przedmiotów czy elementów, to degradacja wspomnianymi produktami spalania. Przygotowane wcześniej osłony mogą zostać wykorzystane w czasie akcji gaśniczej i uchronić elementy przed dużymi a czasami nieodwracalnymi zmianami.

9.3 Próba wdrożeniowa na obiekcie rzeczywistym

9.3.1 Charakterystyka obiektu i elementu zabezpieczanego – konstrukcja więźby dachowej

Próbie wdrożeniową przeprowadzono na obiekcie zabytkowym o przeznaczeniu skarlanym zlokalizowanym w Małopolsce. Obiekt oddany do użytkowania 1824 r. o konstrukcji murowanej. Konstrukcja wieży oraz dachu wykonana z elementów drewnianych - ciosanych. Na podstawie dokumentacji konserwatorskiej wykorzystany gatunek drewna to jodła. W obiekcie w zakresie elementów drewnianych więźby dachowej nie wykonywano zmian czy wymian elementów. Jedynie w roku 1896 istniejące pokrycie z gontu wymieniono na pokrycie miedziane na pełnym deskowaniu. Łączenie elementów więźby dachowej w obrębie konstrukcji dachowej nad nawą główną i prezbiterium wykonane z wykorzystaniem łączników drewnianych. Natomiast w zakresie wieży łączniki stalowe oraz opisane już łączniki drewniane.

9.3.2 Projekt zabezpieczenia i przebieg implementacji

Próbie wdrożenia wykonano na elemencie więźby dachowej w obiekcie opisanym powyżej. Do zabezpieczenia wybrano trzy główne warianty będące następstwem opisanych pozytywnych cech włókna szklanego jako elementu osłonowego tj.: niska masa własna, elastyczność, łatwość montażu w skomplikowanym układzie konstrukcyjnym. Do aplikacji wykorzystano tkaniny stosowane w badaniu jak włókno szklane typu 560 g/m², włókno szklane o gramaturze 530 g/m² oraz włókno szklane modyfikowane wermikulitem.

Montaż wykonywany był przez dwie osoby bez większych problemów technicznych z wykorzystaniem zszywacza automatycznego akumulatorowego typowego dla branży tapicerskiej.

Utrudnienia, na które napotkano w trakcie montażu, to szczepienie nieobszytych zakończeń tkaniny szklanej. Skutkowało to koniecznością zawinięcia materiału na

końcach w kierunku zabezpieczanego materiału. Kolejny ważny aspekt to lokalne uciąganie włókien przy konieczności poprawy mocowania (nierówno zamontowanego materiału) z wykorzystaniem wąskich zszywek. Przy zastosowaniu poszerzeń w postaci podkładek lub dodatkowego paska obszytego włókna szklanego w miejscu mocowania problem został wyeliminowany. Zabieg ten minimalizował też uszkodzenia w trakcie demontażu końcowego osłony.

Układ konstrukcyjny narzucał wykorzystanie w pełni możliwości tkanin, co zostało przedstawione na zdjęciach poniżej. Zabezpieczenie zostało wykonane punktowo, jednak bez utrudnień może zostać ono wykonane na dużej powierzchni. Wykonane zabezpieczenie pozostawiono na obiekcie przez okres 30 dni. Nie stwierdzono uciągnięcia materiałów, odpadnięcia czy innych zmian.



Rysunek 95. Zabezpieczane elementy więźby dachowej

Na zdjęciu poniżej wykonano zabezpieczenie deskowania oraz krokwi i wsporników dachowych. Do części elementów materiał przylega ściśle a do reszty w sposób luźny, wykorzystując właściwości materiału determinowane przez lokalny układ przestrzenny konstrukcji.



Rysunek 96. Zabezpieczone deskowanie oraz krokwie

Mając na względzie trudności, jakie można napotkać przy zabezpieczeniu elementów przestrzennych np. całych połaci - skosów dachowych, wykorzystano opisaną koncepcję podwieszenia tkaniny na linkach wciągniętych do wykonanego zaszycia w materiale.

Powstała szczelina powietrzna może spełniać dodatkową warstwę izolacyjną, jednak jest to szersze zagadnienie dla dalszych badań. Zabezpieczenie to wykonano bardzo szybko, a odpowiedni naciąg zapewniono śrubami rzymskimi pod osłoną materiału.



Rysunek 97. Tkanina szklana rozpięta na linkach stalowych. Pełne zabezpieczenie i deskowania oraz pozostałych elementów połaci dachowej w tym obszarze

Ważnym aspektem jest możliwość dość swobodnego układania tkaniny na zabezpieczanym elemencie, co daje duże możliwości aplikacyjne w rzeczywistych warunkach. Na zdjęciu poniżej wskazano na takie właśnie wykorzystanie materiału, świadomie zastosowano połączenie różnych materiałów w ramach jednego punktu do zabezpieczenia.



Rysunek 98. Wykorzystanie trzech kawałków materiału do dokładnego zabezpieczenia węzła konstrukcji drewnianej

9.4 Podsumowanie rozdziału

Rozdział dziewiąty wykazał, że osłony z tkanin technicznych na bazie włókna szklanego mogą być praktyczną, opłacalną i akceptowalną ze strony konserwatorskiej metodą biernej ochrony pożarowej drewnianych elementów konstrukcyjnych zarówno w obiektach zabytkowych, jak i nowych. Próba wdrożeniowa potwierdziła wykonalność techniczną, zgodność z wymogami ochrony zabytków oraz konkurencyjność ekonomiczną. Rekomendacją dla praktyków jest rozważenie osłon tekstylnych jako alternatywy lub uzupełnienia dla tradycyjnych rozwiązań, szczególnie w przypadkach, gdzie drewno zabytkowe wymaga delikatnej i odwracalnej ingerencji.

ROZDZIAŁ 10. ANALIZA KOMPUTEROWA — MODELOWANIE POŻARU W FDS/PYROSIM

Rozdział dziesiąty stanowi uzupełniający element pracy, którego celem jest konfrontacja wyników badań poligonowych opisanych w rozdziale 8. z wynikami symulacji numerycznej przeprowadzonej w środowisku Fire Dynamics Simulator (FDS) przy użyciu interfejsu graficznego PyroSim. Symulacja CFD nie pełni roli podstawowej metody badawczej, stanowi jednak narzędzie walidacyjne i porównawcze, służące weryfikacji hipotezy głównej poprzez sprawdzenie, w jakim stopniu model numeryczny odwzorowuje mierzalne zjawiska zarejestrowane na stanowisku poligonowym. Podejście to jest spójne z coraz powszechniej stosowaną w inżynierii pożarowej zasadą łączenia metod eksperymentalnych z obliczeniową mechaniką płynów (CFD), pozwalającą na identyfikację ograniczeń modeli numerycznych oraz ocenę ich potencjału projektowego.

10.1 Charakterystyka narzędzi obliczeniowych — FDS i PyroSim

Fire Dynamics Simulator (FDS) to program komputerowy opracowany przez National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) we współpracy z VTT Technical Research Centre of Finland, przeznaczony do numerycznego modelowania termodynamiki i dynamiki pożaru. FDS rozwiązuje zestaw równań opisujących niskoprędkościowy przepływ reagujących gazów, transport ciepła przez promieniowanie i konwekcję, pirolizę ciał stałych oraz powstawanie i transport dymu. Model turbulencji oparty jest na metodzie Large Eddy Simulation (LES), a spalanie modelowane metodą mieszanek (*mixture fraction combustion model*). Program jest powszechnie stosowany przez społeczność inżynierii pożarowej do celów projektowych, badawczych i śledczych, a jego kolejne wersje podlegają systematycznej walidacji na podstawie szerokich baz danych eksperymentalnych¹⁸⁶.

PyroSim jest graficznym interfejsem użytkownika (GUI) dla programu FDS, opracowanym przez Thunderhead Engineering¹⁸⁷. Na terenie Polski wyłącznym autoryzowanym dystrybutorem oprogramowania PyroSim jest firma STIGO Sp. z o.o.^{188,189}. PyroSim umożliwia budowanie modeli geometrycznych metodą

¹⁸⁶ K. McGrattan, [i. in.]; *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, 2023.

¹⁸⁷ Tamże.

¹⁸⁸ <https://stigo.com.pl/pyrosim>, STIGO Sp. z o.o. Sp.k., *PyroSim - symulacje rozwoju pożaru i pracy instalacji oddymiania*, Kraków 2025, [01.06.2026].

¹⁸⁹ <https://pyrosim.pl> STIGO Sp. z o.o. Sp.k., *PyroSim - interfejs FDS*, Kraków 2025, [01.06.2026].

bezpośredniego modelowania brył 3D, definiowanie materiałów, warunków brzegowych i urządzeń pomiarowych (termopar, mierników strumienia ciepła, pomiar zadymienia itp.) oraz analizę wyników symulacji w środowisku Smokeview.

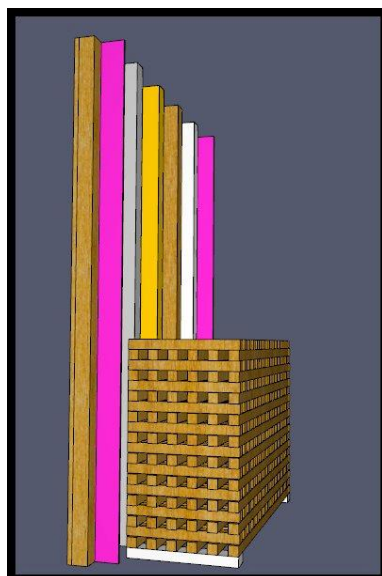
W autorskiej praktyce zawodowej oprogramowanie PyroSim/FDS stosowane jest na co dzień - zarówno do projektowania i weryfikacji skuteczności systemów oddymiania, jak i do analiz popożarowych. Posiadane doświadczenie praktyczne stanowi istotny kontekst dla oceny możliwości i ograniczeń narzędzia w zakresie modelowania układów materiałowych będących przedmiotem pracy.

W kontekście badania kluczowa jest funkcjonalność FDS dotycząca modelowania przewodzenia ciepła w ciałach stałych. Program rozwiązuje jednowymiarowe równanie przewodzenia ciepła prostopadle do powierzchni każdej przegrody (*solid phase heat conduction*), śledząc ewolucję profilu termicznego w przekroju próbki. Parametry materiałowe: gęstość, ciepło właściwe, przewodność cieplna oraz kinetyczne parametry pirolizy, definiowane są osobno dla każdej warstwy, co umożliwia modelowanie układów wielowarstwowych: drewno iglaste + tkanina techniczna. Podstawowym ograniczeniem dla analizowanego modelu jest brak możliwości uwzględnienia efektów lokalnej anizotropii drewna (szczeliny radiacyjne, sęki i inne wady)¹⁹⁰.

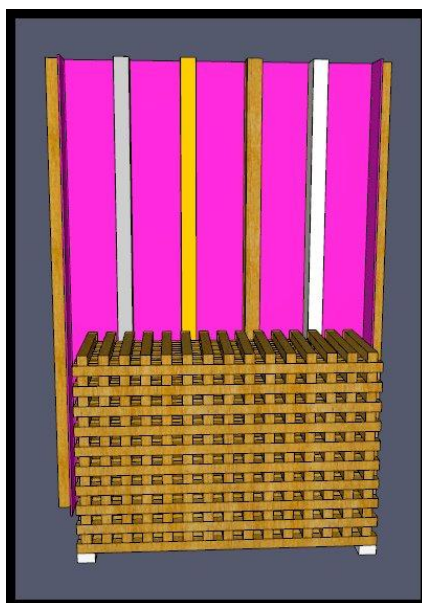
10.2 Model numeryczny stanowiska poligonowego

Geometria modelu odwzorowuje konfigurację stanowiska poligonowego opisanego w rozdziale 8. Ściana badawcza o wymiarach 2,0 m (szerokość) × 2,5 m (wysokość) zamodelowana została jako układ czterech pionowych belek drewnianych o przekroju 8 × 16 cm, rozmieszczonych w odstępach 27 cm, z wypełnieniem przestrzeni między nimi płytą gipsowo - kartonową (GKF 12,5 mm). Przed ścianą umieszczony został stos drewnianych beleczek 5 × 5 cm (150 × 100 × 100 cm) w odległości 5 cm od powierzchni ściany, stanowiący źródło pożaru - analogicznie do układu w próbie poligonowej. Poniżej przedstawiono widoki modelu geometrycznego przygotowanego w środowisku PyroSim.

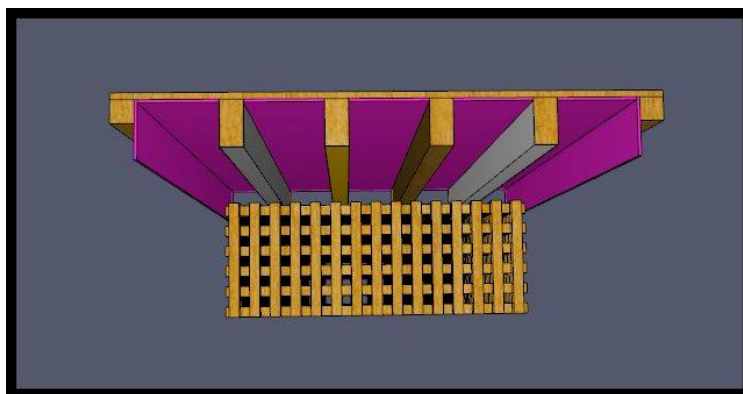
¹⁹⁰ A. Rinta-Paavola, S. Hostikka, *A model for the pyrolysis of two nordic structural timbers*, Fire and Materials, nr 46(1), 2021.



Rysunek 99. Widok modelu geometrycznego w PyroSim – projekcja boczna. Widoczna ściana badawcza z czterema belkami (elementy A - D) oraz stos drewnianych beleczek stanowiący źródło pożaru. Opracowanie własne w środowisku PyroSim



Rysunek 100. Widok frontowy modelu (od strony ekspozycji termicznej). Układ geometryczny stosu i ściany badawczej z belkami pionowymi i wypełnieniem GKF. Opracowanie własne w środowisku PyroSim



Rysunek 101. Widok modelu od góry - odległość stosu od powierzchni ściany (5 cm) oraz rozmieszczenie belek. Opracowanie własne w środowisku PyroSim

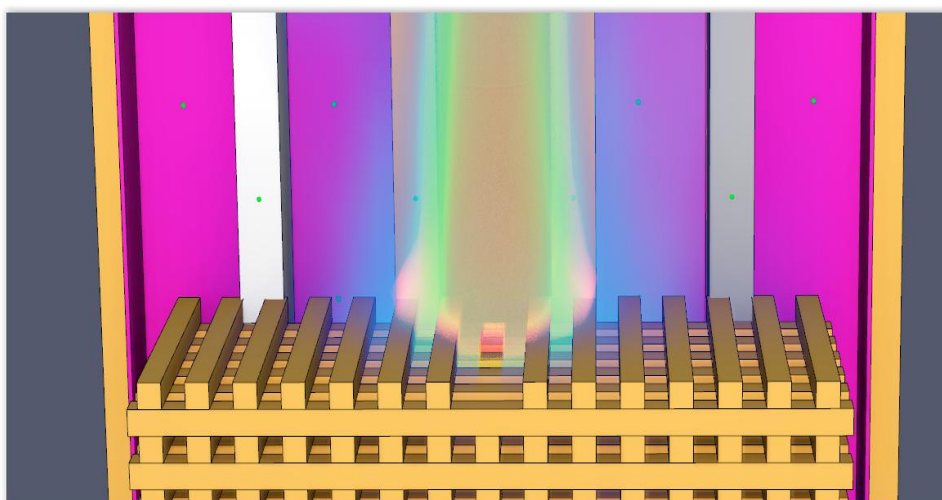
Właściwości materiałowe drewna iglastego litego (świerk/sosna) przyjęto na podstawie danych literaturowych. Gęstość drewna w stanie suchym: 450 kg/m^3 ; przewodność cieplna: $0,16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Parametry kinetyczne pirolizy: energia aktywacji, ciepło pirolizy dobrano na podstawie modeli kinetycznych opracowanych przez Rinta-Paavola i Hostikkę^{191,192}, gdzie autorzy przedstawili zwalidowane zestawy parametrów pirolizy dla świerku i sosny nordyckiej, przeznaczone bezpośrednio do implementacji w FDS. Dla tkanin technicznych przyjęto parametry odpowiadające charakterystyce materiałowej, określonej w rozdziale 7.: emisyjność powłoki aluminiowej ok. 0,05 - 0,15, wermikulitowej ok. 0,85 - 0,90, włókna szklanego surowego ok. 0,85.

W parametrach materiałowych uwzględniono również wilgotność belek analizowanych oraz drewna w stosie. Wprowadzono parametry środowiskowe takie jak: temperatura otoczenia, ciśnienie oraz wilgotność względna.

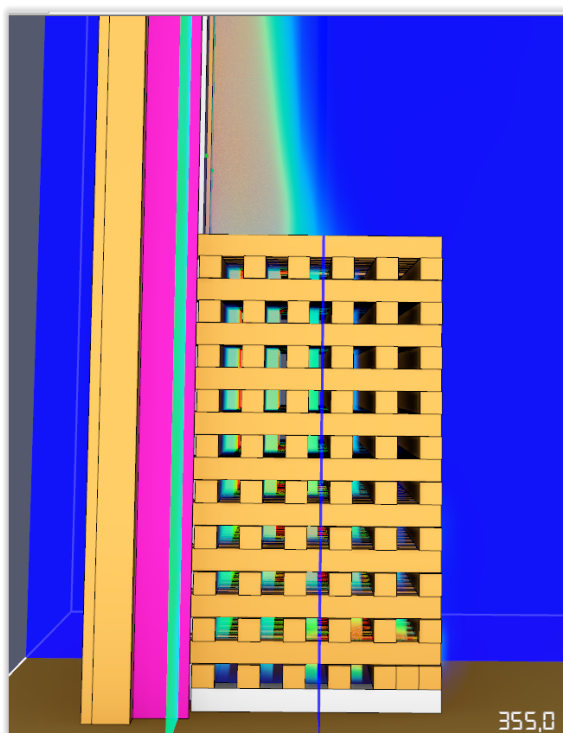
Elementu, którego nie udało się wprowadzić w symulacji, to wizualne zmiany w zakresie spalanego stosu oraz momentu jego przewrócenia. Jednak te parametry są w analizie drugorzędne. W programie, spalanie – ubytek masy jest przedstawiane przez powolne „znikanie” elementów drewna w katarakcie wizualizacji.

¹⁹¹ A. Rinta-Paavola, *A model for the pyrolysis....*

¹⁹² S. Hostikka, *Numerical modeling of radiative....*



Rysunek 102. Brak odwzorowania efektu pirolizy – ubytku masy w sposób wizualny.
Opracowanie własne w środowisku PyroSim



Rysunek 103. Brak odwzorowania efektu pirolizy – ubytku masy w sposób wizualny.
Opracowanie własne w środowisku PyroSim

Siatka obliczeniowa zaprojektowana została z nominalną wielkością komórki 5 cm w strefie stosu i ściany badawczej, z lokalnym zagęszczeniem do 2 cm w obszarze pożaru testowego. Analizę wrażliwości siatki przeprowadzono dla trzech wariantów (5 cm, 3 cm, 2 cm). Wyniki wykazały stabilność rozwiązania dla siatki 5 cm w zakresie temperatur wewnętrznych belek, przy 4 - krotnym wzroście czasu obliczeń przy przejściu

Opracowanie własne w środowisku PyroSim

10.3 Wyniki symulacji i porównanie z danymi poligonowymi

Symulacja dostarczyła rozkładów temperatury w przekrojach czterech belek w funkcji czasu (odpowiadających pozycjom termopar T1 - T8 w badaniu poligonowym), w zakresie pól temperatur na powierzchni ściany wizualizowanych w Smokeview.

Dodatkowo umiejscowiono jeszcze punkty pomiarowe na osłonie z GKF oraz nad spalonym stosem. Hipotetyczny punkt na wysokość 2,5 m, co byłoby bardzo trudne do zrealizowania w rzeczywistej próbie. Ostatecznie ustawiono 28 punktów pomiarowych temperatury.

Profile termiczne na głębokości 8 cm. Profile temperatury wyznaczone przez FDS w lokalizacjach odpowiadających termoparom T1 - T8 wykazują ogólną zbieżność trendu z danymi pomiarowymi. Hierarchia skuteczności materiałów w symulacji jest zgodna z wynikami poligonowymi.

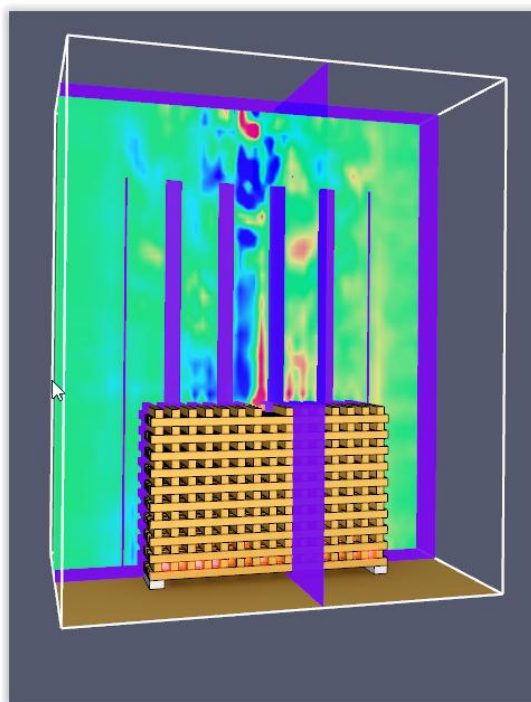
Rozbieżności ilościowe między modelem a pomiarem mieszczą się w zakresie typowym dla walidacji modeli FDS złożonych układów materiałowych (odchylenia rzędu 15 - 30% dla parametrów globalnych)¹⁹³. Większe rozbieżności dla próbki z powłoką aluminiową wynikają z ograniczenia modelu FDS, nie odwzorowuje dynamiki pęknięcia i odpajania tkaniny obserwowanego w próbie poligonowej od ok. 12. minuty ekspozycji. Zidentyfikowano następujące główne źródła rozbieżności:

- jednowymiarowy charakter modelu przewodzenia w fazie stałej, nieuwzględniający lokalnego wpływu sęków, szczelin radiacyjnych i innych wad drewna,
- brak modelu degradacji mechanicznej tkanin,
- utrudnione odwzorowanie w modelu incydentalnego pojawiania się spalania płomieniowego powyżej tkaniny oraz przy materiałach o luźniejszym splocie na jego powierzchni,
- incydentalne podmuchy wiatru do 1,1 m/s nieuwzględnione jako zmienne warunki brzegowe,
- brak opracowanych modeli porównawczych.

Wykorzystywany program PyroSim oczywiście posiada możliwości analizy wpływu wiatru na model i przebieg pirolizy jednak, aby to odwzorowanie było mierzalne

¹⁹³ <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/> Thunderhead Engineering, *PyroSim User Manual*, Manhattan, KS: Thunderhead Engineering Consultants, 2024, [01.06.2026].

wykonane pomiary siły i kierunku wiatru musiałyby być wykonane z dużą dokładnością w funkcji czasu. Dopiero na podstawie takich danych, ta zmienna mogłaby być uwzględniona w modelu.



Rysunek 105. Wizualizacja spalania w 400 s. Symulacji
Opracowanie własne w środowisku PyroSim

10.4 Ocena przydatności narzędzia i wnioski

Symulacja FDS/PyroSim, traktowana jako narzędzie walidacyjne wobec wyników poligonowych, prowadzi do następujących wniosków:

- model poprawnie odwzorowuje ogólny trend termiczny zarejestrowany w badaniu poligonowym, fazę intensywnego nagrzewania i hierarchię skuteczności materiałów osłonowych (wermikulit > kocówka > aluminium), na podstawie pomiarów temperatury, co potwierdza reprezentatywność narzędzia jako wspomagającego elementy analizy komputerowej,
- wykonana analiza potwierdziła pozytywny wpływ ograniczenia temperatury dla materiału tzw. „kocówka”, spowodowane jest to tym, że w modelu nie uwzględniono negatywnego wpływu podmuchów wiatru na wyniki, czego nie udało się uniknąć w rzeczywistej próbie. Wspomniane podmuchy i lokalne zmiany mocy pożaru w warunkach poligonowych wpłynęły na niepewność w zakresie skuteczności materiału typu „kocówka”,

- prognozowane ubytki masy belek drewnianych są zbieżne z danymi pomiarowymi w akceptowalnym zakresie walidacyjnym. Największa zgodność uzyskana została dla próbki świadek,
- narzędzie FDS/PyroSim wykazuje przydatność na etapie wstępnego doboru i rankingowania materiałów ochronnych bez konieczności przeprowadzania pełnoskalowych prób poligonowych, co redukuje liczbę koniecznych badań fizycznych na etapie koncepcyjnym,
- wyniki analizy wpisują się w cel pracy, dostarczając dodatkowych argumentów na rzecz skuteczności tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako pasywnych systemów ochrony termicznej elementów drewnianych. Symulacja CFD stanowi narzędzie projektowe dla dalszych badań i wdrożeń inżynierskich,
- zalecane jest traktowanie wyników symulacji jako szacunku z niepewnością rzędu $\pm 20 - 30\%$ w zakresie ubytku masy i $\pm 10 - 15\%$ w zakresie temperatur wewnętrznych, z obowiązkową walidacją doświadczalną przy opracowywaniu konkretnego rozwiązania dla praktyki budowlanej. Kluczową luką wymagającą uzupełnienia w przyszłych pracach jest opracowanie modeli destrukcji tkanin oraz zjawisk towarzyszących procesowi pirolizy. W celu wykonania dokładnego modelu, konieczne jest przeprowadzanie szeregu badań pełnoskalowych, które dadzą materiał porównawczy dla określenia przydatności danego modelu numerycznego.

Szczególnie przydatny może się okazać wypracowany model CFD, dla określenia możliwości zabezpieczenia tkaninami technicznymi elementów drewnianych w obiektach zabytkowych i skomplikowanych układach ciesielskich jak: wieże, więźby obiektów monumentalnych. Są to obszary, gdzie standardowe podejście inżynierskie i pożarnicze ma duże ograniczenia. Brak udokumentowanych pożarów testowych takich obiektów z wiadomych przyczyn, pozostawia dużą lukę aplikacyjną dla symulacji FDS.

ROZDZIAŁ 11. DYSKUSJA WYNIKÓW I WERYFIKACJA HIPOTEZ BADAWCZYCH

Rozdział dziesiąty stanowi syntezę wyników uzyskanych w dwóch komplementarnych programach eksperymentalnych badaniach laboratoryjnych (rozdział 7) oraz badaniach poligonowych (rozdział 8), a także konfrontację tych wyników z hipotezą główną i hipotezami szczegółowymi sformułowanymi w rozdziale 1. Celem rozdziału jest ocena potwierdzenia przyjętych tez oraz uporządkowanie wniosków w sposób umożliwiający ich dalsze wykorzystanie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, w szczególności w kontekście ochrony elementów nośnych z drewna litego iglastego w obiektach o ograniczonych możliwościach zastosowania klasycznych metod ochrony biernej.

11.1. Synteza wyników badań laboratoryjnych i poligonowych

Program badawczy realizowany w ramach niniejszej rozprawy obejmował dwie skale eksperymentalne oraz trzy konfiguracje obciążenia termicznego: ekspozycję na strumień promieniowania podczerwonego (stanowisko laboratoryjne, wariant I), ekspozycję złożoną, promieniowanie z palnikiem gazowym (stanowisko laboratoryjne, wariant II) oraz ekspozycję w warunkach pożaru testowego na ścianie w skali makro (badania poligonowe). Dla każdej z tych konfiguracji oceniano te same parametry wyjściowe: głębokość zwęglenia elementu z drewna litego iglastego, rozkład temperatur w przekroju oraz stan materiału osłonowego po ekspozycji.

Wyniki laboratoryjne wykazały, że średnia głębokość zwęglenia próbek niezabezpieczonych („świadków”) mieści się w przedziale 18,0 - 20,5 mm, przy czym w większości próbek tej serii obserwowano inicjację spalania płomieniowego w przedziale 26 - 30 minuty ekspozycji. Zastosowanie osłon tekstylnych na bazie włókna szklanego obniżyło tę wartość do poziomu 7,2 - 11,0 mm w zależności od wariantu materiałowego, co odpowiada redukcji średniej szybkości zwęglania o około 45 - 60%. Najwyższą skuteczność wykazała tkanina z modyfikacją wermikulitową (7,2 - 9,25 mm; redukcja 55 - 60%), najniższą - tkanina z jednostronną powłoką aluminiową (7,8 - 11,0 mm; redukcja 45 - 57%), przy czym rozrzut wyników w tej ostatniej serii wynikał w znacznej mierze z doświadczalnie potwierdzonej wrażliwości materiału na zmienność gęstości próbek drewna.

Wprowadzenie palnika gazowego jako drugiego źródła ciepła (wariant II) zwiększyło średnią głębokość zwęglenia we wszystkich seriach o około 2,0 - 2,5 mm, a w serii kontrolnej o około 4,0 mm. Zasadnicza hierarchia skuteczności poszczególnych osłon pozostała jednak zachowana. Obserwacja ta potwierdza, że przyrost destrukcji przy połączonym oddziaływaniu promieniowania i płomienia dotyczy w większym stopniu procesu termodegradacji drewna niż samej tkaniny, z zastrzeżeniem zwiększonej podatności powłoki aluminiowej na miejscową utratę ciągłości.

Wyniki badań poligonowych, obejmujących trzy warianty materiałowe wytypowane na podstawie rankingu laboratoryjnego (tkanina z powłoką aluminiową, tkanina z modyfikacją wermikulitową oraz tkanina szklana o gramaturze 560 g/m² określona jako „kocówka”) oraz element referencyjny, potwierdziły zgodność kierunku wpływu osłony na proces zwęglenia. Średnia głębokość zwęglenia elementu referencyjnego wyniosła 23,64 mm, dla tkaniny aluminiowej 18,23 mm, dla tkaniny wermikulitowej 15,90 mm, a dla tkaniny szklanej „kocówki” 13,52 mm. Odpowiada to redukcji średniej głębokości zwęglenia o około 23%, 33% i 43% w stosunku do próbki referencyjnej. Jest to wartość uśredniona z całej wysokości próbki tj. 2 m, co ma bardzo duże znaczenie dla dalszego analizowania tego parametru jednostkowo.

Bezwzględne wartości redukcji głębokości zwęglenia różnią się między skalami eksperymentalnymi, co jest zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z różnicy obciążenia termicznego: badanie poligonowe prowadzone w warunkach pożaru rzeczywistego, o wyższej temperaturze, zaś stanowiska laboratoryjne stanowią ujednolicone, kontrolowane źródło ciepła o zdefiniowanym strumieniu. Istotne jest natomiast, że hierarchia skuteczności poszczególnych tkanin uzyskana w skali laboratoryjnej została utrzymana również w skali poligonowej w części dotyczącej redukcji szybkości zwęglenia, natomiast odwrócenie relatywnej pozycji tkaniny szklanej niemodyfikowanej („kocówki”) w próbie poligonowej wymaga osobnej interpretacji, element ten był usytuowany od strony nawietrznej i uzyskane temperatury powierzchniowe były niższe niż na pozostałych trzech kolumnach ściany badawczej.

Na poziomie jakościowym oba programy ujawniły zbliżone mechanizmy towarzyszące ochronie: opóźnienie inicjacji zwęglenia od strony ekspozycji, utrzymanie ciągłości osłony w pierwszej fazie pożaru, ograniczenie liczby i głębokości pęknięć radialnych w drewnie oraz redukcję temperatury mierzonej w punktach wewnątrz

przekroju. W badaniach poligonowych dla termopar na głębokości 8 cm i wysokości 1 i 2 m, przesunięcie czasowe osiągnięcia temperatury 100°C wynosiło 4 - 5 min dla elementów zabezpieczonych w stosunku do próbki referencyjnej, co ma bezpośrednią wartość praktyczną z punktu widzenia czasu dostępnego na ewakuację i działania interwencyjne.

11.2. Weryfikacja hipotezy głównej

Hipoteza główna rozprawy zakładała, że zewnętrzna osłona z tkaniny technicznej na bazie włókna szklanego stanowi skuteczną przegrodę termiczną, opóźniającą zwęglenie, a w konsekwencji utratę nośności ogniowej elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru testowego. Zestawione wyniki obu programów eksperymentalnych dostarczają argumentów za potwierdzeniem tej hipotezy.

W każdej konfiguracji materiałowej i w każdej skali eksperymentalnej stwierdzono statystycznie wyraźną i powtarzalną redukcję głębokości zwęglenia w stosunku do elementu niezabezpieczonego. W ujęciu obliczeniowym przy zastosowaniu metody przekroju reszkowego według PN-EN 1995-1-2 i normowej prędkości zwęglania dla drewna litego iglastego rzędu 0,65 - 0,8 mm/min uzyskane różnice głębokości zwęglenia 5 - 10 mm w stosunku do elementu referencyjnego przekładają się na opóźnienie frontu zwęglenia rzędu kilku, kilkunastu minut. Dla czasów odporności ogniowej typowo wymaganych w budownictwie (R15, R30) stanowi to istotny margines bezpieczeństwa.

Hipoteza główna zostaje zatem uznana za potwierdzoną w zakresie warunków pokrywanych przez program badawczy, tj. dla elementów z drewna litego iglastego o wymiarach próbek laboratoryjnych 80 × 160 × 250 mm oraz belek w badaniu poligonowym 80 × 160 mm, dla czasu ekspozycji do 30 minut oraz dla zakresu wilgotności drewna 12 - 16%. Rozszerzenie tych granic w szczególności na dłuższe czasy ekspozycji, większe przekroje lub drewno o niższej wilgotności wymaga osobnej weryfikacji.

11.3. Weryfikacja tez szczegółowych

Opóźnienie inicjacji zwęglenia

Teza zakładała, że zastosowanie osłony z tkaniny technicznej na bazie włókna szklanego opóźnia inicjację zwęglenia drewna w porównaniu z elementem niezabezpieczonym. Obserwacje przeprowadzone w obu programach badawczych

potwierdzają tę tezę. W badaniach laboratoryjnych inicjacja zwęglenia elementu referencyjnego następowała po kilku minutach od rozpoczęcia badania, podczas gdy w próbkach zabezpieczonych widoczne zwęglenie pojawiało się znacznie później, a na obrzeżach materiału oraz przy podstawie próbki niemal niewidoczne. W badaniach poligonowych przesunięcie czasowe osiągnięcia temperatury 100°C w punkcie pomiarowym rzędu 4 - 5 min przedstawia wymierny wpływ na przesunięcie czasowe rozpoczęcia procesów pirolizy.

Zróznicowanie skuteczności między typami tkanin

Teza postulowała, że skuteczność ochrony termicznej różni się między badanymi typami tkanin, a najwyraźniejsza różnica dotyczy porównania elementów zabezpieczonych i niezabezpieczonych. Wyniki obu programów potwierdzają tę tezę. W skali laboratoryjnej redukcja głębokości zwęglenia ze względu na rodzaj tkaniny mieściła się w zakresie 45 - 60%, zaś w skali poligonowej 23 - 43%. Skala różnic między poszczególnymi tkaninami jest wyraźnie mniejsza niż różnica między dowolną tkaniną a elementem niezabezpieczonym. Istotny wniosek dodatkowy dotyczy mechanizmu: tkaniny z modyfikacjami powierzchniowymi (wermikulit, aluminium) oferują dodatkową redukcję temperatury powierzchni w pierwszej fazie pożaru (dla powłoki aluminiowej różnica przekraczała w laboratoryjnej fazie początkowej 200°C), co czyni je bardziej przydatnymi w scenariuszach wczesnej interwencji, podczas gdy tkanina niemodyfikowana okazała się najbardziej stabilna mechanicznie w dłuższym czasie ekspozycji poligonowej.

Zgodność wyników laboratoryjnych i poligonowych

Teza szczegółowa zakładała, że wyniki badań laboratoryjnych i poligonowych są ze sobą zgodne w granicach niepewności pomiarowej, co potwierdziłoby moc predykcyjną badań laboratoryjnych. Teza ta zostaje potwierdzona w sposób warunkowy. W wymiarze jakościowym zgodność jest pełna: w obu skalach potwierdzono fakt redukcji głębokości zwęglenia przez każdą z badanych tkanin, zachowano też porządek relatywny między tkaninami z modyfikacją wermikulitową i aluminiową. W wymiarze ilościowym zgodność jest ograniczona bezwzględne wartości głębokości zwęglenia w skali poligonowej są istotnie większe niż w skali laboratoryjnej, co odpowiada wyższej intensywności obciążenia termicznego. Badania laboratoryjne wykazują zatem moc predykcyjną w zakresie rankingu materiałów i mechanizmów, natomiast w zakresie

prognozowania bezwzględnych wartości zwęglenia wymagają uzupełnienia o badania w skali zbliżonej do rzeczywistej lub o odpowiednie współczynniki skalujące wyznaczone eksperymentalnie.

Przydatność jako rozwiązania zamiennego

Teza ta dotyczyła możliwości zastosowania tkanin technicznych jako rozwiązania zamiennego w zakresie biernej ochrony przeciwpożarowej, uzupełniającego lukę systemową w tym obszarze. Weryfikacja tej tezy wykracza poza sam eksperyment i wymaga umieszczenia wyników w kontekście normowo - prawnym przedstawionym w rozdziale 5. Uzyskana redukcja głębokości zwęglenia potwierdzona w dwóch niezależnych programach badawczych, stanowi przesłankę techniczną uzasadniającą kwalifikację tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako rozwiązania zamiennego w szczególności w obiektach, w których zastosowanie klasycznych metod ochrony biernej jest niemożliwe lub wykluczone ze względu na rygory konserwatorskie. Tak sformułowany wniosek ma charakter wstępnej kwalifikacji technicznej i wymaga potwierdzenia w badaniach akredytowanych przed wdrożeniem jako rozwiązania typowego. Teza zostaje uznana za potwierdzoną warunkowo w zakresie przesłanek technicznych, z zastrzeżeniem ścieżki certyfikacji.

11.4. Ograniczenia badań i niepewności pomiarowe

Ocena zasięgu wniosków wymaga jawnego wskazania ograniczeń programu badawczego oraz źródeł niepewności pomiarowych. Wyróżnić należy cztery zasadnicze obszary.

Po pierwsze, ograniczenia wynikające z zakresu materiałowego. Badaniom poddano jeden gatunek drewna iglastego (świerk pospolity) reprezentujący jeden z najpowszechniej stosowanych surowców konstrukcyjnych w polskim budownictwie. Rozciągnięcie wniosków na drewno liściaste, drewno inżynieryjne (CLT, LVL) lub drewno zabytkowe o zmienionej gęstości wymaga osobnych badań. Tkaniny wytypowane do badań reprezentują trzy typowe rozwiązania rynkowe, jednak pełna ocena rodziny materiałowej (np. zmienność gramatury, splotu, grubości powłok) pozostaje przedmiotem dalszych prac.

Po drugie, ograniczenia wynikające ze skali i czasu ekspozycji. Maksymalny czas ekspozycji w próbie poligonowej wynosił 30 minut, co odpowiada klasom odporności ogniowej do R30. Badania nie obejmują klas wyższych (R60, R90, R120), dla których

zachowanie osłony może być jakościowo odmienne, w szczególności w zakresie utraty ciągłości mechanicznej tkaniny. Przy wyższej intensywności i dłuższym czasie nie można również wykluczyć, że mechanizm ochrony zostanie istotnie zmieniony, co potwierdzają oględziny i zakres uszkodzeń powłok po badaniu poligonowym.

Po trzecie, źródła niepewności pomiarowej. W badaniach laboratoryjnych dominującym źródłem niepewności jest zmienność gęstości i wilgotności próbek drewna (mimo zachowania przedziału wilgotności 12 - 14% i tolerancji wymiarowej ± 4 mm) oraz błąd własny metody pomiaru głębokości zwęglenia opartej na mechanicznym wciśnięciu szablonu do warstwy zwęglonej (szacowany na ok. 0,5 mm). Jako niepewność należy też wskazać zmienność samej próbki w obrębie lokalnych zmian gęstości oraz powtarzalności rozkładu słoików, bieli i twardzieli. W badaniach poligonowych do tych czynników dochodzi zmienność warunków atmosferycznych, w szczególności podmuchy wiatru (rejestrowane wartości do 1,1 m/s pomimo zastosowania osłon przeciwwietrznych). Dodatkowym ograniczeniem jest wykonanie pojedynczej próby poligonowej, pełne oszacowanie niepewności z wykorzystaniem metod statystycznych wymaga powtórzenia eksperymentu w takim samym układzie oraz przy zmiennej konfiguracji elementów ściany badawczej.

Po czwarte, ograniczenia dotyczące zakresu ocenianych parametrów. Program badawczy obejmował ocenę szybkości zwęglania oraz rozkładu temperatur i stanu osłony. Poza zakresem badań pozostaje bezpośredni pomiar nośności resztkowej elementu obciążonego (klasa R) oraz parametrów szczelności i izolacyjności ogniowej (klasy E, I). Wnioski dotyczące wpływu osłony na nośność ogniową oparte są na założeniu, że redukcja głębokości zwęglenia przekłada się proporcjonalnie na zmniejszenie ubytku przekroju nośnego zgodnie z metodą przekroju resztkowego wg PN-EN 1995-1-2. Bezpośrednia weryfikacja wymaga badań elementów pod przyłożonym obciążeniem.

11.5. Znaczenie wyników dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego

Uzyskane wyniki wnoszą do dyscypliny inżynierii bezpieczeństwa pożarowego trzy główne wartości: danych eksperymentalnych, kontekstu normatywnego i aplikacyjnego.

W warstwie eksperymentalnej rozprawa dostarcza pierwszych systematycznych, polskich danych o skuteczności tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako

samodzielnej zewnętrznej osłony termicznej drewna litego iglastego, udokumentowanych w dwóch komplementarnych skalach. Ranking materiałowy oraz zakres redukcji głębokości zwęglenia mogą być wykorzystane jako punkt wyjścia dla prac nad nowymi konfiguracjami materiałowymi lub nad udoskonaleniem procedur badawczych w laboratoriach akredytowanych.

W warstwie normatywnej uzyskane wyniki wpisują się w kierunek zmian zapowiadany dla Eurokodu 5 (PN-EN 1995-1-2). Wyniki rozprawy umożliwiają sformułowanie hipotezy roboczej o możliwości ujęcia osłon tekstylnych w systemie współczynników redukcyjnych prędkości zwęglania, analogicznie do istniejących rozwiązań dla płyt gipsowo-kartonowych.

W warstwie aplikacyjnej wyniki stanowią bezpośrednią podstawę techniczną do wykorzystania tkanin szklanych jako zabezpieczenia zamiennego lub tymczasowego w scenariuszach, w których klasyczne metody ochrony biernej są niemożliwe do zastosowania w obiektach zabytkowych o rygorach konserwatorskich, w konstrukcjach o złożonej geometrii (wieżby dachowe, stropy otwarte) oraz w fazie prac remontowo-budowlanych, w których docelowy poziom zabezpieczeń biernych nie został jeszcze osiągnięty. Udokumentowana redukcja szybkości zwęglania i opóźnienie osiągnięcia krytycznych temperatur w przekroju elementu przekładają się na dodatkowy margines czasowy dla ewakuacji osób oraz działań ratowniczo-gaśniczych, co stanowi wartość bezpośrednio praktyczną z punktu widzenia służb ratowniczych i projektantów.

Przedstawione w niniejszym rozdziale syntezy i wnioski stanowią jednocześnie punkt wyjścia dla zakończenia rozprawy, w którym zebrane zostaną najważniejsze rezultaty pracy oraz sformułowane rekomendacje dla dalszych badań i praktyki inżynierskiej.

ZAKOŃCZENIE

Niniejsza rozprawa doktorska podjęła zagadnienie biernej ochrony przeciwpożarowej elementów nośnych z drewna litego iglastego w obiektach, w których zastosowanie klasycznych metod ochrony okładzin płytowych, mas natryskowych, farb pęczniejących i impregnacji ogniochronnej jest niemożliwe, niewykonalne lub wykluczone ze względu na wymagania konserwatorskie i techniczno-użytkowe. Jako odpowiedź na zidentyfikowaną lukę badawczo-techniczną przedmiotem rozprawy uczyniono empiryczną weryfikację przydatności wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako zewnętrznych osłon termicznych elementów z drewna litego iglastego w warunkach oddziaływania pożarowego.

Podsumowanie osiągniętych celów

Cel główny rozprawy, zdefiniowany jako empiryczna weryfikacja przydatności wybranych tkanin technicznych jako zewnętrznych osłon termicznych i określenie wpływu osłony na szybkość zwęglenia oraz inne parametry degradacji elementu chronionego w warunkach pożaru, został osiągnięty w pełnym zakresie. W ramach autorskiego programu badawczego wykonano:

- kwerendę literatury naukowej i przegląd normowy pozwalający na identyfikację luki badawczej w zakresie zastosowania tkanin technicznych jako samodzielnej zewnętrznej osłony termicznej drewna litego iglastego,
- projekt i wykonanie dwóch laboratoryjnych stanowisk badawczych (z zestawem promienników podczerwieni oraz z palnikiem gazowym uzupełniającym promienniki), umożliwiających porównawczą ocenę tkanin w kontrolowanych warunkach ekspozycji,
- projekt i wykonanie stanowiska poligonowego w postaci ścianki drewnianej o wymiarach $2,0 \times 2,5$ m, obciążonej stosem drewnianym o kontrolowanym źródle zapłonu, odwzorowującej warunki pożaru zewnętrznego,
- pomiary głębokości zwęglenia, rozkładu temperatur w przekroju próbek i elementów oraz ocenę stanu materiału osłonowego po ekspozycji,
- analizę porównawczą czterech wariantów materiałowych (tkanina z modyfikacją wermikulitową, tkanina szklana ECTS 530, tkanina szklana o gramaturze 560 g/m², tkanina z jednostronną powłoką aluminiową) z uwzględnieniem próbki referencyjnej,

- konfrontację wyników z hipotezą główną i hipotezami cząstkowymi, zawartą w rozdziale 10.

Hipoteza główna, postulująca, że zewnętrzna osłona z tkaniny technicznej na bazie włókna szklanego stanowi skuteczną przegrodę termiczną, opóźniającą zwęglenie elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru testowego, została potwierdzona w obu skalach eksperymentalnych. Uzyskana redukcja głębokości zwęglenia wyniosła 45 - 60% w skali laboratoryjnej oraz 23 - 43% w skali poligonowej w stosunku do elementu niezabezpieczonego. Hipotezy szczegółowe dotyczące opóźnienia inicjacji zwęglenia, zróżnicowania skuteczności między typami tkanin oraz zgodności jakościowej wyników laboratoryjnych i poligonowych zostały potwierdzone. Hipoteza szczegółowa dotycząca przydatności tkanin jako rozwiązania zamiennego w zakresie biernej ochrony przeciwpożarowej została potwierdzona warunkowo w zakresie przesłanek technicznych, z zachowaniem konieczności ścieżki certyfikacyjnej przed wdrożeniem jako rozwiązania typowego.

Najważniejsze wnioski poznawcze i aplikacyjne

Na podstawie całości przeprowadzonych badań sformułować można następujące wnioski poznawcze:

- po pierwsze, tkaniny techniczne na bazie włókna szklanego stanowią skuteczną przegrodę termiczną dla elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru testowego. Mechanizm ochrony obejmuje jednocześnie osłabienie strumienia promieniowania docierającego do badanego elementu, ograniczenie dostępu tlenu do warstwy pirolizującej oraz ograniczenie migracji gazów pożarowych przy zachowaniu ciągłości materiału przez pierwsze kilkanaście minut ekspozycji,
- po drugie, skuteczność poszczególnych tkanin zależy od ich konstrukcji i modyfikacji powierzchniowej. Tkanina z modyfikacją wermikulitową zapewnia zrównoważoną ochronę przy dobrej stabilności termicznej i mechanicznej. Tkanina z powłoką aluminiową zapewnia wyjątkową ochronę radiacyjną w fazie początkowej, lecz wykazuje istotną podatność na degradację mechaniczną przy połączonym oddziaływaniu promieniowania i płomienia. Tkanina szklana niemodyfikowana o większej gramaturze zachowuje największą ciągłość mechaniczną w dłuższym czasie ekspozycji,

- po trzecie, badania laboratoryjne wykazują moc predykcyjną w zakresie rankingu materiałów i charakterystyki mechanizmów ochrony, natomiast prognozowanie bezwzględnych wartości głębokości zwęglenia dla pełnej skali wymaga uzupełnienia o badania w skali zbliżonej do rzeczywistej lub o eksperymentalne współczynniki skalujące.

W warstwie aplikacyjnej sformułować można następujące wnioski praktyczne:

- po pierwsze, tkaniny techniczne na bazie włókna szklanego stanowią potencjalną alternatywę dla klasycznych metod ochrony biernej w przypadku obiektów zabytkowych, w których wymagania konserwatorskie wykluczają zastosowanie okładzin płytowych, mas natryskowych lub impregnacji ogniochronnej. Odwracalność montażu (brak nieodwracalnej ingerencji w substancję historyczną) stanowi istotną wartość praktyczną z punktu widzenia ochrony dóbr kultury,
- po drugie, tkaniny techniczne znajdują uzasadnione zastosowanie jako zabezpieczenie tymczasowe w fazie prac remontowo-budowlanych, w której docelowy poziom zabezpieczeń biernych nie został jeszcze osiągnięty, a ryzyko pożarowe jest podwyższone ze względu na obecność otwartego ognia, iskier i materiałów łatwopalnych. Zidentyfikowany w literaturze udział 21% pożarów obiektów z listy Światowego Dziedzictwa, które powstały podczas prac renowacyjnych, czyni te warstwy zastosowań szczególnie istotnymi,
- po trzecie, tkaniny techniczne stanowią rozwiązanie o wysokiej zdolności adaptacyjnej do złożonych geometrii konstrukcyjnych (wieżby dachowe, stropy otwarte), w których montaż okładzin sztywnych jest utrudniony lub niewykonalny.

Wkład własny autora i oryginalność pracy

Wkład własny autora obejmuje całość procesu badawczego: identyfikację problemu na podstawie wieloletniej praktyki zawodowej w ochronie przeciwpożarowej i działalności w zakresie ustalania przyczyn pożarów, sformułowanie problemu naukowego i hipotez, opracowanie programu badań, projekt i wykonanie stanowisk laboratoryjnych i poligonowego, przeprowadzenie pomiarów, analizę i interpretację wyników oraz sformułowanie wniosków. Oryginalność rozprawy wyraża się w czterech płaszczyznach:

- w warstwie badawczej – uzyskanie pierwszych udokumentowanych na gruncie krajowym danych eksperymentalnych dotyczących skuteczności tkanin technicznych na bazie włókna szklanego jako samodzielnych, zewnętrznych osłon termicznych drewna litego iglastego, zweryfikowanych zarówno w skali laboratoryjnej, jak i poligonowej,
- w warstwie metodycznej - opracowanie autorskich stanowisk badawczych (laboratoryjnego w dwóch wariantach obciążenia termicznego oraz poligonowego w postaci ściany testowej z kontrolowanym źródłem ognia) oraz procedury porównawczej dla tkanin w konfiguracji tkanina - szczelina powietrzna - drewno lite, możliwej do zaadaptowania w dalszych badaniach akredytowanych,
- w warstwie aplikacyjnej - sformułowanie wstępnych wytycznych dla wdrożenia tkanin technicznych jako zamiennych lub tymczasowych zabezpieczeń biernych, w tym wskazanie ograniczeń i warunków montażu dla złożonych geometrii, oraz wykonanie wdrożeniowej próby punktowej na rzeczywistym obiekcie w obrębie więźby dachowej.

W warstwie normatywnej - odniesienie uzyskanych wyników do metody przekroju resztkowego zgodnie z PN-EN 1995-1-2 oraz wskazanie możliwego kierunku rozwoju Eurokodu 5, zbieżnego z obecnie prowadzonymi pracami nad rewizją tego dokumentu.

Znaczenie praktyczne wyników dla inżynierii bezpieczeństwa

Z perspektywy praktyki inżynierskiej wyniki rozprawy wskazują na zasadność włączenia tkanin technicznych do bazy możliwych komponentów ochrony przeciwpożarowej jako wiedzę dla projektantów i rzeczoznawców ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych, jako rozwiązania uzupełniającego dotychczasowe metody biernej ochrony. Udokumentowana redukcja szybkości zwęglenia i opóźnienie osiągnięcia krytycznych temperatur w przekroju elementu dają dodatkowy margines czasowy dla ewakuacji oraz działań ratowniczo-gaśniczych, co jest wprost przekładalne na wymogi zawarte w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

Potencjał wdrożeniowy i rekomendacje dla praktyki

Wyniki rozprawy, w połączeniu z udokumentowaną próbą wdrożeniową na rzeczywistym obiekcie, uzasadniają sformułowanie następujących ostrożnych rekomendacji dla praktyki:

- po pierwsze, tkaniny techniczne na bazie włókna szklanego mogą być rozważane jako element rozwiązania zamiennego w rozumieniu obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych, pod warunkiem uzyskania indywidualnej ekspertyzy technicznej i zgody właściwego organu,
- po drugie, zastosowanie tkanin technicznych jako zabezpieczenia tymczasowego w fazie prac remontowo-budowlanych rekomenduje się jako praktykę zmniejszającą ryzyko pożarowe w okresie przejściowym, niewymagającą definitywnego wdrożenia jako rozwiązania typowego i możliwą do wprowadzenia w ramach dokumentacji wykonawczej i planu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia,
- po trzecie, zaleca się prowadzenie dalszych badań umożliwiających pełną kwalifikację techniczną tkanin technicznych na ścieżce certyfikacyjnej, w szczególności:
 - badań elementów pod obciążeniem mechanicznym w warunkach pożaru, umożliwiających bezpośrednią ocenę wpływu osłony na nośność ogniową (klasa R),
 - badań dłuższych ekspozycji termicznych w celu weryfikacji zachowania osłony w wyższych klasach odporności ogniowej,
 - badań powtarzalności w skali poligonowej z wykorzystaniem znormalizowanych krzywych temperaturowo - czasowych,
 - badań długoterminowej trwałości tkanin w warunkach eksploatacyjnych (UV, wilgoć, cykle termiczne), istotnych dla oceny żywotności rozwiązania; badań dla drewna o innych charakterystykach (drewno liściaste, drewno inżynieryjne CLT, LVL,) oraz dla drewna zabytkowego o zmienionej gęstości.

Podjęte w rozprawie zagadnienie mieści się w rdzeniu dyscypliny inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, łącząc perspektywę materiałową, konstrukcyjną i normatywną z bezpośrednią wartością aplikacyjną dla ochrony życia, zdrowia i dziedzictwa kulturowego. Przedstawione wyniki otwierają przestrzeń dla dalszych badań oraz praktycznych wdrożeń, które w kolejnych latach mogą przyczynić się do systemowego podniesienia poziomu bezpieczeństwa pożarowego obiektów o konstrukcji drewnianej.

WYKAZ RYSUNKÓW

Rysunek 1. Procesy chemiczne i fizyczne w próbce palącego się drewna.....	40
Rysunek 2. Temperatury zapłonu drewna	48
Rysunek 3. Strefy temperatury w przekroju poprzecznym litego drewna narażonego na działanie ognia.	49
Rysunek 4. Głębokość zwęglania $d_{char,0}$ dla zwęglania jednokierunkowego oraz hipotetyczna głębokość zwęglania $d_{char,n}$	51
Rysunek 5. Definicja szczątkowego i efektywnego przekroju poprzecznego.....	54
Rysunek 6. Porównanie głębokości zwęglania elementu litego oraz z naturalnymi pęknięciami	62
Rysunek 7. Elementy więźby dachowej zabezpieczone impregnatem, informacje z dokumentacji technicznej jednego z producentów systemów ogniochronnych.....	63
Rysunek 8. Zmiany w rozkładzie temperatur – drewno lite.....	66
Rysunek 9. Natrysk ogniochronny na siatce cięto-ciągnionej (zabezpieczenie stropu drewnianego).....	68
Rysunek 10. Elementy więźby dachowej kościoła Mariackiego w Krakowie – opracowanie własne.....	69
Rysunek 11. Tablica porównanie uszkodzeń: element lewy niezabezpieczony, prawy zabezpieczony farbą pęczniącą.....	72
Rysunek 12. Efekt zastosowania powłoki pęczniącej na elementach drewna klejonego przy mocy promiennika testowego 50 kW/m ² , (BT – brak zabezpieczenia, CA – powłoka A, CB – powłoka B, CC – powłoka C)	73
Rysunek 13. Efekt zastosowania powłoki pęczniącej na elementach drewna klejonego przy mocy promiennika testowego 25,50 i 75 kW/m ² (BT – brak zabezpieczenia, CA – powłoka A, CB – powłoka B, CC – powłoka C)	74
Rysunek 14. Powłoka o niskiej grubości DFT testowana przy mocy 75 kW/m ² (A – uszkodzenie przyczepności powłoki, B Odpadanie zwęglonego drewna, C pęknięta powierzchnia powłoki).....	74
Rysunek 15. Stanowisko badawcze i próbka po badaniach opisana w materiałach Y. Tsapko	79
Rysunek 16. Jedna z prób w rzeczywistych warunkach przytoczona w opracowaniu F. Takahashi	80
Rysunek 17. Schemat procesu formowania włókien szklanych	83
Rysunek 18. wyroby z tekstylnych włókien szklanych.....	83
Rysunek 19. Sploty tkanin szklanych a) płócienny, b) satynowy 4-krotny, tkanina o wysokim module, d) tkanina UD, e) tkanina o splocie płóciennym, f) tkanina rovingowa o splocie rządzkowych	84

Rysunek 20. Tkaniny wystawione na działanie strumienia o mocy 84 kW/m^2 przez czas 1 min (a) aramid/fiberglass; (b) 100% fiberglass	85
Rysunek 21. Przykład zastosowania elastycznych kurtyn dymowych z tekstyliów technicznych w rzeczywistych warunkach obiektowych.....	88
Rysunek 22. Zabezpieczenie kabiny kocem gaśniczym przed odpryskami z cięcia. Autor T. Puchała AlpinCroll.....	90
Rysunek 23. Przenikanie ciepła przez ściankę płaską wielowarstwową.....	95
Rysunek 24. Schemat blokowy stanowiska. Opracowanie własne	108
Rysunek 25. Tkanina szklana wariant A – opracowanie własne	114
Rysunek 26. Tkanina szklana wariant A1– opracowanie własne	114
Rysunek 27. Tkanina szklana z powłoką aluminium wariant B– opracowanie własne.....	115
Rysunek 28. Tkanina szklana z powłoką aluminium wariant B– opracowanie własne.....	115
Rysunek 29. Pomiary parametru emisyjności ϵ_R dla wybranych tkanin. Opracowanie własne	117
Rysunek 30. Stanowisko pomiarowe do badania próbek elementów ochron osobistych poddanych działaniu promieniowania cieplnego.....	119
Rysunek 31. Próbką 1. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy.....	122
Rysunek 32. Próbką 1. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy.....	122
Rysunek 33. Termogram próbka 1. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony	122
Rysunek 34. Termogram próbka 1. odległość 5 cm, czas 120 s po otwarciu przesłony.....	122
Rysunek 35. Próbką 2. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy.....	123
Rysunek 36. Termogram próbka 2. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony	123
Rysunek 37. Termogram próbka 2. odległość 5 cm, czas 113 s po otwarciu przesłony.....	124
Rysunek 38. Próbką 3. po lewej Termogram po prawej obszar ustalony do analizy.....	124
Rysunek 39. Termogram próbka 3. odległość 5 cm, czas 5 s po otwarciu przesłony	125
Rysunek 40. Termogram próbka 3. odległość 5 cm, czas 71 s po otwarciu przesłony	125
Rysunek 41. Pomiar na stanowisku badawczym osłabienia strumienia promieniowania – opracowanie własne	126
Rysunek 42. Mocowanie tkaniny na stanowisku badawczym: zdjęcie po lewej od strony promiennika, zdjęcie po prawej po zdementowaniu próbki.....	127
Rysunek 43. Stanowisko badawcze	130
Rysunek 44. Zestaw promienników w osłonie na stanowisku badawczym.....	131
Rysunek 45. Zestaw promienników i palnik gazowy (układ drugiego badania)	131
Rysunek 46. Pomiar masy próbki	135
Rysunek 47. Pierwsze testy stanowiska i założenia koncepcyjne	138
Rysunek 48. Zakończenie suwmiarki wykorzystanej do pomiaru głębokość zwęglania.....	141
Rysunek 49. Pomiar głębokości zwęglania z wykorzystaniem szablonu	142
Rysunek 50. Próbką świadek - widok na strony ekspozycji i profil boczny	143

Rysunek 51. Próbkę świadek widok na strony ekspozycji i profil boczny	143
Rysunek 52. Próbkę powłoka z wermikulitem - widok od strony ekspozycji i widok od góry	145
Rysunek 53. Powłoka z włókna szklanego z modyfikacją wermikulitem po próbach na stanowisku z promiennikami	145
Rysunek 54. Próbkę powłoka ECTS 530 - widok od strony ekspozycji i widok od góry.....	146
Rysunek 55. Powłoka z włókna szklanego 530 g/m ² po próbach na stanowisku z promiennikami	147
Rysunek 56. Próbkę powłoka tzw. kocówka gramatura 560 g/m ² profil boczny i widok od góry	148
Rysunek 57. Powłoka z tkaniny szklanej 560 g/m ² po próbach na stanowisku z promiennikami oraz widoczne szczepienie materiału jako utrudnienie eksploatacyjne.....	148
Rysunek 58. Próbkę powłoka modyfikowana aluminium, strona ekspozycji i widok od góry.	149
Rysunek 59. Powłoka z modyfikacją płatkami aluminium jednostronnie na stanowisku z promiennikami oraz widoczne wykruszenie lokalne powłoki po badaniu.....	150
Rysunek 60. Struktura ściany badawczej w czasie przygotowania do badań	166
Rysunek 61. Ścianka badawcza przed testami na stanowisku poligonowym	166
Rysunek 62. Pomiar warunków środowiskowych na stanowisku badawczym.....	167
Rysunek 63. Widoczne osłony przeciwwiatrowe w trakcie badania.....	168
Rysunek 64. Suszenie beleczek w laboratorium oraz gotowy stos na stanowisku.....	169
Rysunek 65. Pomiar wilgotności przed rozpoczęciem testów poligonowych.....	169
Rysunek 66. Nasączenie beleczek oraz ich umiejscowienie w stosie badawczym	170
Rysunek 67. Inicjacja pożaru testowego (zapalenia nasączonych pasków w dolnej warstwie).	170
Rysunek 68. Punkty pomiarowe i oznaczenie elementów badanych od strony stanowiska pomiarowego	181
Rysunek 69. Zapis termowizyjny w trakcie badania poligonowego	182
Rysunek 70. Termogram z zaznaczonymi analizowanymi polami termicznymi do czasu zapadnięcia stosu palącego się drewna	183
Rysunek 71. Termogram z zaznaczonymi analizowanymi polami termicznymi po zapadnięciu stosu z palącego się drewna.....	183
Rysunek 72. Zdjęcie po lewej - widoczne uszkodzenie powłoki element D i C; zdjęcie po prawej - uszkodzenie powłoki element A	189
Rysunek 73. Uszkodzenia powłok zabezpieczających przed rozpoczęciem gaszenia czas 29'30''	189
Rysunek 74. Stan ściany po zakończeniu badania oraz przechłodzeniu ściany do temp. 30°C	190
Rysunek 75. Uszkodzenia powłoki z natryskiem aluminium	191
Rysunek 76. Uszkodzenia powłoki z wermikulitem	191

Rysunek 77. Uszkodzenia powłoki włókno szklane tzw. kocówka	192
Rysunek 78. Uszkodzenia próbki typu świadek bez zabezpieczeń.....	192
Rysunek 79. Stan ściany po demontażu osłon GKF	193
Rysunek 80. Pozostałości powłoki z modyfikacją aluminium po zdemontowaniu płyty GKF między elementami	194
Rysunek 81. Pozostałości powłoki z modyfikacją aluminium po zdemontowaniu z zabezpieczanego elementu	194
Rysunek 82. Materiał z powłoką aluminium zdjęcie przed badaniem.....	194
Rysunek 83. Pozostałości powłoki z modyfikacją wermikulitem po zdemontowaniu płyty GKF między elementami	195
Rysunek 84. Pozostałości osłony z modyfikacją wermikulitem po zdemontowaniu.....	195
Rysunek 85. Tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem przed próbą poligonową.....	196
Rysunek 86. Tkanina szklana z modyfikacją wermikulitem po próbie poligonowej	196
Rysunek 87. Pozostałości powłoki z włókna szklanego gramatura 560g/m ²	196
Rysunek 88. Tkanina szklana bez modyfikacji zdjęcie po lewej przed próbą po prawej po próbie poligonowej.....	197
Rysunek 89. Powłoka zabezpieczająca po zdemontowaniu z elementu drewnianego.....	197
Rysunek 90. Wykorzystanie szablonu do pomiaru głębokości zwęglania.....	198
Rysunek 91. Uszkodzenie elementu drewnianego „świadek”	199
Rysunek 92. Uszkodzenie elementu drewnianego zabezpieczonego tkaniną szklaną z powłoką aluminium	200
Rysunek 93. Uszkodzenie elementu drewnianego zabezpieczonego włóknem szklanym z modyfikacją wermikulitem	201
Rysunek 94. Osiemnastowieczny strop drewniany, który z racji konieczności podwyższenia klasy odporności ogniowej musiał zostać zdemontowany. Brak zgody na dodatkowe obciążenie statyczne konstrukcji. Ludmiła Olszowska.....	208
Rysunek 95. Zabezpieczane elementy więźby dachowej	212
Rysunek 96. Zabezpieczone deskowanie oraz krokwie	212
Rysunek 97. Tkanina szklana rozpięta na linkach stalowych. Pełne zabezpieczenie i deskowania oraz pozostałych elementów połaci dachowej w tym obszarze	213
Rysunek 98. Wykorzystanie trzech kawałków materiału do dokładnego zabezpieczenia węzła konstrukcji drewnianej	213
Rysunek 99. Widok modelu geometrycznego w PyroSim – projekcja boczna. Widoczna ściana badawcza z czterema belkami (elementy A - D) oraz stos drewnianych beleczek stanowiący źródło pożaru. Opracowanie własne w środowisku PyroSim	217

Rysunek 100. Widok frontowy modelu (od strony ekspozycji termicznej). Układ geometryczny stosu i ściany badawczej z belkami pionowymi i wypełnieniem GKF. Opracowanie własne w środowisku PyroSim	217
Rysunek 101. Widok modelu od góry - odległość stosu od powierzchni ściany (5 cm) oraz rozmieszczenie belek. Opracowanie własne w środowisku PyroSim	218
Rysunek 102. Brak odwzorowania efektu pirolizy – ubytku masy w sposób wizualny. Opracowanie własne w środowisku PyroSim	219
Rysunek 103. Brak odwzorowania efektu pirolizy – ubytku masy w sposób wizualny. Opracowanie własne w środowisku PyroSim	219
Rysunek 104. Wizualizacja siatki obliczeniowej 5cm. Opracowanie własne w środowisku PyroSim.....	220
Rysunek 105. Wizualizacja spalania w 400 s. Symulacji Opracowanie własne w środowisku PyroSim.....	222

WYKAZ TABEL

Tabela 1. Zależność przewodności cieplnej od temperatury dla drewna i warstwy zwęglonej ..	34
Tabela 2. Wartości obliczeniowe prędkości zwęglania β_n i β_0 drewna, LVL, okładzin drewnianych i płyt drewnopochodnych.....	52
Tabela 3. Określenie k_0 powierzchni niezabezpieczonych, t w minutach wraz z uwzględnieniem tabeli poniżej z tej samej normie.....	53
Tabela 4. Zabezpieczenie belek i słupów impregnatem ogniochronnym, porównanie parametrów	62
Tabela 5. Wpływ grubości powłoki pęczniejącej i rodzaju użytego środka na redukcję szybkości zwęglania przy temperaturze 300°C i zmiennej mocy promiennika testowego.....	75
Tabela 6. Porównanie właściwości wybranych typów włókien szklanych.....	82
Tabela 7. Wybrane tkaniny na bazie włókna szklanego dostępne na rynku polskim	92
Tabela 8. Typowe wady drewna dyskwalifikujące próbki zbadania.....	112
Tabela 9. Procedura badawcza dotycząca ustalenia mocy strumienia	119
Tabela 10. Podstawowe parametry określone w trakcie pomiaru	120
Tabela 11. Wyznaczony na stanowisku badawczym jw. wykres mocy strumienia w funkcji odległości	121
Tabela 12. Usytuowanie termopar na stanowisku laboratoryjnym	134
Tabela 13. Przebieg badania poligonowego.....	172
Tabela 14. Odczyty z termopara [°C] w trakcie próby poligonowej zgodnie z lokalizacją jw.	181
Tabela 15. Głębokości zwęglania w rozbiciu na elementy badawcze	202

WYKAZ WYKRESÓW

Wykres 1. Zależność przewodności cieplnej od temperatury dla drewna i warstwy zwęglonej.	34
Wykres 2. Wykres prędkości zwęglania w funkcji gęstości dla testów według standardowej krzywej temperatura-czas	38
Wykres 3. Wykres prędkości ubytku masy w funkcji gęstości dla testów według standardowej krzywej temperatura-czas	39
Wykres 4. Wykres tempo zwęglenia w zależności od zawartości wilgoci dla standardowych testów krzywej czas-temperatura (z podziałem na badaczy)	42
Wykres 5. Przebieg zmienności k_0 : a) dla niezabezpieczonych elementów i zabezpieczonych, przy $t_{ch} \leq 20$ minut, b) dla zabezpieczonych elementów, przy $t_{ch} > 20$ minut	54
Wykres 6. Wpływ na prędkość zwęglania płyty z sosny bielastej (impregnat na bazie soli)	64
Wykres 7. Wpływ na prędkość zwęglania płyty z drewna topoli (impregnat na bazie soli)	65
Wykres 8. Wpływ grubości powłoki pęczniącej na końcową głębokość zwęglonej warstwy (SOO – brak zabezpieczenia, S05 – 0,5mm; S13- 1,3 mm; S21 – 2,1 mm)	76
Wykres 9. Elekt blokowania strumienia ciepła w rozróżnieniu na różne materiały	86
Wykres 10. Moc strumienia określona na stanowisku badawczym parametrów	120
Wykres 11. Osłabienia strumienia promieniowania Próbką 1 – Włókno szklane 530+30 z płatkami aluminium Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja $R\text{-squared} = 0.983752$	121
Źródło: Opracowanie autora i dr Jana Giełżeckiego	121
Wykres 12. Osłabienia strumienia promieniowania Próbką nr 2 włókno szklane + wermikulit Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja $R\text{-squared} = 0.968341$	123
Wykres 13. Osłabienia strumienia promieniowania Próbką nr 3 włókno szklane pokryte płatkami aluminium. Wykres po lewej pomiar rzeczywisty, wykres po prawej aproksymacja $R\text{-squared} = 0.975075$	124
Wykres 14. Głębokość zwęglania próbki: świadek oraz przy zastawianiu poszczególnych materiałów osłonowych	151
Wykres 15. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 25 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	152
Wykres 16. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 45 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	152
Wykres 17. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 60 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	153
Wykres 18. Temperatury zmierzone przed osłoną z materiału oraz na powierzchni próbki świadek bez osłony	154

Wykres 19. Zmiany temperatury za osłoną przed próbką badawczą	154
Wykres 20. Głębokość zwęglania próbki: świadek oraz przy zastawianiu poszczególnych materiałów osłonowych	159
Wykres 21. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 25 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	160
Wykres 22. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 45 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	160
Wykres 23. Temperatury zmierzone przez termoparę w odległości 60 mm od czoła próbki w funkcji czasu badania	160
Wykres 24. Temperatury zmierzone przed osłoną z materiału oraz na powierzchni próbki świadek bez osłony	161
Wykres 25. Temperatury zmierzone za osłoną z materiału technicznego w czasie próby z palnikiem i promiennikiem.	161
Wykres 26. Temperatura poszczególnych elementów na gł. 8 cm i wysokości 1m oraz porównawczy wykres temperatury na wysokości spalanego stosu.....	179
Wykres 27. Temperatura poszczególnych elementów na gł. 8 cm i wysokości 2 m	180
Wykres 28. Średnia temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania .	184
Wykres 29. Maksymalna temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania	184
Wykres 30. Minimalna temperatura na powierzchni danego elementu w trakcie całego badania	184
Wykres 31. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 1.....	185
Wykres 32. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 2.....	185
Wykres 33. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 3.....	185
Wykres 34. Charakterystyka temperaturowa próbka nr 4.....	186

WYKAZ WZORÓW

1. <https://promat.com/pl-pl/budownictwo/centrum-wiedzy/strefa-eksperta/45770/czym-sa-krzywe-rozwoju-pozaru>, [20.04.2026].
2. A.I. Barlett, R.M Hadden, L.A. Bisby A, *Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction* 2019, wzór nr 15
3. PN-EN 1995-1-2:2008. Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: wzór nr 3.4.
4. PN-EN 1995-1-2:2008. Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: wzór nr 3.4; 3.5 i 3.6
5. PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, wzór 3.1
6. PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, wzór 3.2
7. PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5, wzór 3.3
8. PN- EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5 wzór 4.1
9. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.7
10. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.37
11. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.38
12. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.39
13. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.40
14. T.S. Wiśniewski, Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków, ITC, Warszawa 2016 wzór 2.36

BIBLIOGRAFIA

1. A.I. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, *A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction*, Fire Technology, 2019.
2. A. Yakhyayv, S. Gezelov, A. Gamidova. S. Rfili. *Improving the fire resistance of wooden structures by a combined method*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologie, 2023.
3. A. Krauze, A. Krasuski, B. Ślęczkowski, *Studium teoretyczne przewidywania ryzyka wystąpienia rozgorzenia, wstecznego ciągu płomieni oraz zapalenia gazów pożarowych*, CNBOP-PIB, Józefów 2016.
4. A. Tomczak, W. Pazdrowski, T. Jelonek, W. Grzywiński, *Jakość drewna sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.). Część I. Charakterystyka wybranych cech i właściwości drewna wpływających na jego jakość*, Sylwan vol. 153, 2009.
5. A. Frangi, A. Just, H. Krenn, J. Schmid, N. Werther [i in.] *The second generation of Eurocode5 – Fire design*, Conference: World Conference on Timber Engineering 2025.
6. A. Lucherini, C. Maluk, Q.S. Rozzaque, *Exploring the fire behaviour of thin intumescent coatings used on timber*, *Fire Safety Journal*, t. 109, 2019.
7. A. Rinta-Paavola, D. Sukhomlinov, S. Hostikka, *Modelling charring and burning of spruce and pine woods during pyrolysis, smoldering and flaming*, Fire Technology, vol. 59(5), 2023.
8. B. Chorlton, B. Forrester, J. Gales, B. Wackman, *Performance of type X gypsum board on timber to non-standard fire exposure*, Fire and Materials, 2019.
9. C.C. Gerhards, *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood an analysis of immediate effects*, U.S. Department of Agriculture, 1980.
10. D. Venegas [i in.], *Fires in World Heritage Buildings*, Advances in Intelligent Systems and Computing 1:1-15, 2021.
11. D. Pieniak, P. Ogrodnik, M. Oszust, L. Dec, *Niezawodność w wysokich temperaturach klejonego warstwowo drewna sosny pospolitej w zakresie wytrzymałości na zginanie statyczne*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr. 3, 2011.
12. D. Habyk, M. Goździewska, J. Kielbratowski, K. Ryncewicz, *Doświadczalna analiza wpływu wilgotności na parametry mechaniczne drewna iglastego* Builder 314(9):11-15, 2023.
13. F. Rodrigues, F. Maia, H. Cruz, *Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century*, International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment 2022.
14. F. Takahashi, A. Abbott, T.Murray [i in.], *Characteristics of Fire Blanket Materials for Structure Protection in Wildland-Urban Interface Fires*, VI International Conference on Forest Fire Research, Coimbra 2010.
15. F. Takahashi, *Whole-House Fire Blanket Protection From Wildland-Urban Interface Fires*, Frontiers in Mechanical Engineering t.5, 2019.

16. F. Wiesner, D. Brandon, A. Lucherini, P. Palma, *Structural Fire Behaviour*, Holistic Design of Taller Timber Building Structures, Springer, 2025.
17. F. Krzysik, *Nauka o drewnie*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1974.
18. G. Harun, B. Chorlton, F. Richter, *The effects of radial cracks on the fire performance of heritage timber*, Fire and Materials t. 47(3), 2023.
19. H. Sivrikaya, M. Wu, H. Militz, *Fire resistance of Scots pine modified with sorbitol, citric acid and fire retardants*, European Journal of Wood and Wood Products, t. 83, nr 1, 2025.
20. J. Zboina (red.), *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa pożarowego obiektów zabytkowych. Wyniki badań i rekomendacje*, CNBOP-PIB, Józefów 2017.
21. J. Zbojna [i in] *Bezpieczeństwo pożarowe obiektów muzealnych i ich zbiorów*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2018.
22. J. Witkowska, H. Lachowicz, *Zmienność gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od wybranych czynników*, Sylwan vol. 157, nr 5, 2013.
23. Krauze, A. Krasuski, B. Ślęczkowski, *Studium teoretyczne przewidywania ryzyka wystąpienia rozgorzenia, wstecznego ciągu płomieni oraz zapalenia gazów pożarowych*, CNBOP-PIB, Józefów 2016.
24. K.L. Friquin, *Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber*, Fire and Materials vol. 35, nr 5, 2011.
25. K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, M. Vanella, *Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST Special Publication 1019*, National Institute of Standards and Technology, 2023.
26. L. Wullschleger, K.G. Wakili, *Numerical parameter study of the thermal behaviour of a gypsum plaster board at fire temperatures*. Fire end Material no 32, 2008.
27. M. Fejdyś, M. Łandwajt, *Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe*, Techniczne Wyroby Włókiennicze, MORATEX 2010.
28. M. Wieruszewski, *Klasyfikacja jakościowo-wytrzymałościowa drewna sosny zwyczajnej*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2019.
29. M. Nagrodzka, D. Małozieć, *Impregnacja drewna środkami ogniochronnymi*, Bezpieczeństwo i Technika Ratownicza 2011.
30. M. Oszust, D. Pieniak, P. Ogrodnik, L. Dec, *Badanie spadku wytrzymałości drewna świerkowego modyfikowanego termicznie w warunkach temperatur pożarowych*, Drewno – Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty Vol. 54, 2011.
31. P. Kotsovinos [i in.]; *Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns*, Fire end Materials nr. 47, 2021.
32. Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, *Wielkoobszarowa Inwentaryzacja Stanu Lasów (WISL) 2016–2020*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2021.
33. P. Kozakiewicz, M. Matejak, *Klimat a drewno zabytkowe*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2006.

34. P. Sulik, *Prędkość zwęglania wybranych krajowych gatunków drewna*, Materiały Budowlane, nr 9, 2022.
35. P. Sulik, M. Rybaczewski, *Wpływ impregnacji na prędkość zwęglania drewna klejonego krzyżowo*, Materiały Budowlane nr 621, 2024.
36. P. Ogrodnik, D. Pieniak, A. Krzyżak, A. Walczak. *Badanie wpływu podwyższonej temperatury na wytrzymałość na ściskanie drewna sosnowego impregnowanego środkiem ogniochronnym zawierającym SiO₂*, Wydawnictwo CNBOP-PIB Vol 33, 2014.
37. Program badawczy NCBR „Nowoczesne technologie nanokompozytowych, refleksyjnych warstw materiałów strażackich ubrań ochronnych” DOB-BIO6/04/104/2014.
38. Robert J. Ross, Forest Products Laboratory (FPL), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, 2021.
39. Rinta-Paavola, S. Hostikka, *A model for the pyrolysis of two Nordic structural timbers*, Fire and Materials, vol. 46(1), 2021.
40. S. Spyridakis, C. Maluk, A. Orabi, D. Barber, F. Wiesner. *Effect of Thin Intumescent Coating Type and Thickness on the Charring of Mass Timber Under Varied Heat Flux Exposure*, Fire Technology 2025.
41. S. Hostikka, K. McGrattan, Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays, Fire Safety Journal, nr 36(8), 2001.
42. S. Wiśniewski, T.S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*, wyd. 6, PWN, Warszawa 2023.
43. T.S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła w ochronach osobistych strażaków*, ITC Warszawa 2016.
44. Venegas D., Erazo O., Farias O., Ayabaca C, Nedina A. *Fires in World Heritage Buildings*, Artificial Intelligence, Computer and Software Engineering Advances 2021.
45. V. Babrauskas, *Ignition of Wood: A Review of the State of the Art*, Journal of Fire Protection Engineering Vol 12, 2002.
46. W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
47. Y. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, M. Kovalenko, Establishing Regularities of Temperature Conductivity Reduction When Protecting Fabric Against Fire by Intumescent Coating, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, t. 2, nr 10, 2022.
48. Y. Tsapko, O. Tsapko, O. Bondarenko, *Determination of the laws of thermal resistance of wood in application of fire-retardant fabric coatings*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020.
49. Y. Tsapko, O. Tsapko, O. Bondarenko. *Defining patterns of heat transfer through the fire-protected fabric to wood*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021.
50. Y. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, M. Kovalenko, *Establishing Regularities of Temperature Conductivity Reduction When Protecting Fabric Against Fire by*

AKTY PRAWNE

1. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, t.j. Dz.U. 2026 poz. 524, art. 5 ust. 1 pkt 1 lit. b.
2. Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, t.j. Dz.U. 2024 poz. 1292, art. 4.
3. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 par. 212 ust. 1.
4. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, Dz. U. 2010 poz. 719, z późn. zm.
5. Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dn. 2 sierpnia 2018 r. W sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, prac restauratorskich i badań konserwatorskich przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków albo na Listę Skarbów Dziedzictwa oraz robót budowlanych, badań architektonicznych i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków, a także badań archeologicznych i poszukiwań zabytków. Dz.U.2018 poz. 1609. z późn. zm.
6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 kwietnia 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach spawalniczych. Dz.U. 2000 nr 40, poz. 470.
7. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych.
8. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 2024/3110 z 27 listopada 2024 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych.
9. Rozporządzenie MSWiA z dnia 5 sierpnia 2023 r. w sprawie uzgadniania projektu budowlanego pod względem ochrony przeciwpożarowej, Dz.U. 2023 poz. 1563,
10. Wytyczne Komenda Główna PSP, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń, Wytyczne w sprawie uzgadniania rozwiązań zamiennych, KG PSP.

11. Wytyczne Generalnego Konserwatora Zabytków dotyczące ochrony zabytków drewnianych i konstrukcji drewnianych w obiektach zabytkowych, DOZ-KiNK.6521.13.2021.

Źródła internetowe:

1. <https://mcr> PROSMOKE FS/CE AUTOMATYCZNE KURTYNY DYMOWE - Systemy przeciwpożarowe i systemy oddymiania | MERCOR [5.04.2026].
2. <https://pabiantex.com.pl> [7.04.2026].
3. <https://sklep.vitcas.pl> [12.04.2026].
4. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim> stigo.com.pl/pyrosim, STIGO Sp. z o.o. Sp.k., PyroSim - symulacje rozwoju pożaru i pracy instalacji oddymiania, Kraków 2025, [01.06.2026].
5. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim> pyrosim.pl STIGO Sp. z o.o. Sp.k., PyroSim - interfejs FDS, Kraków 2025, [01.06.2026].
6. <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim> Thunderhead Engineering, PyroSim User Manual, Manhattan, KS: Thunderhead Engineering Consultants, 2024. [01.06.2026].

Normy:

1. PN-EN 1995-1-1:2010 Projektowanie konstrukcji drewnianych – Reguły ogólne i reguły dla budynków.
2. PN-EN 1995-1-2:2008 Projektowanie konstrukcji drewnianych z uwagi na warunki pożarowe.
3. PN-EN 338:2016-06, Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.
4. PN-EN 14081-1:2019-11, Konstrukcje drewniane – Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo – Część 1: Wymagania ogólne, PKN, Warszawa 2016.
5. PN-EN 1869:2019-12 Koce gaśnicze Norma określająca wymagania dotyczące budowy, właściwości gaśniczych, znakowania i metod badań.
6. PN-EN 13381-7:2019-07 Metody badań do wyznaczania wpływu zabezpieczeń ogniowych na elementy konstrukcyjne. Część 7: Zabezpieczenia elementów drewnianych.
7. ISO 23932-1:2018 Fire safety engineering. General principles. Part 1: General, ISO

8. ISO 834 1:2025 Fire-resistance tests — Elements of building construction, Part 1: General requirements.
9. PN-EN 13501-1:2019-02 Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień,

STRESZCZENIE

Tytuł:

Wykorzystanie wybranych tkanin technicznych na bazie włókna szklanego do zabezpieczenia elementów z drewna litego iglastego w warunkach pożaru

Streszczenie:

Rosnące zainteresowanie drewnem jako materiałem konstrukcyjnym, budownictwo energooszczędne, presja klimatyczna na materiały o niskim śladzie węglowym, kontrastuje z utrzymującą się luką w dostępności skutecznych metod biernej ochrony pożarowej dla obiektów o złożonej geometrii lub podlegających rygorom konserwatorskim. Klasyczne technologie (okładziny płytowe, masy natryskowe, farby pęczniące, impregnacja) zawodzą, zwłaszcza w historycznych więźbach i stropach otwartych tam, gdzie ingerencja w substancję zabytkową jest wykluczona, a ryzyko pożarowe bywa najwyższe.

Systematyczna kwerenda piśmiennictwa wykazała brak szczegółowych badań dotyczących wykorzystania tkaniny technicznej na bazie włókna szklanego, stosowanej jako samodzielna zewnętrzna przegroda termiczna na nośnym elemencie z drewna litego iglastego w warunkach pożaru wewnętrznego. Materiał od lat sprawdzony w kurtynach, kocach gaśniczych i odzieży ochronnej, nie był dotychczas oceniany w tej roli, co stanowi precyzyjnie zlokalizowaną lukę badawczą i uzasadnienie podjęcia tematu.

Praca opiera się na autorskim, trójpoziomowym programie eksperymentalnym. Na poziomie laboratoryjnym, zaprojektowano i wykonano dwa stanowiska badawcze: z zestawem promienników podczerwieni (ekspozycja radiacyjna) oraz z palnikiem gazowym wspomaganym promiennikami (ekspozycja kombinowana). Próbkę z drewna litego iglastego, osłaniano czterema wariantami tkanin: (A) modyfikacja wermikulitowa, (B) powłoka aluminiowa jednostronna, (C) tkanina szklana ECTS 530 g/m², (D) tkanina szklana 560 g/m², każdorazowo z próbką świadkiem jako odniesieniem. Na poziomie poligonowym zrealizowano pełnoskalową próbę pożarową, mającą na celu potwierdzić wyniki laboratoryjne i przydatność badanych materiałów do ochrony elementów drewnianych. Trzecim poziomem jest opracowanie modelu komputerowego, analiza CFD w środowisku FDS/PyroSim, pełniąca rolę walidacyjną i porównawczą.

Każdy wariant tkaniny skutecznie zredukował głębokość zwęglenia w obu skalach: 45 - 60% w laboratorium i 23 - 43% w skali poligonowej. Wartości bezwzględne po 30 - minutowej ekspozycji poligonowej: świadek 23,6 mm, wermikulit 15,9 mm, kocówka, 13,5 mm, aluminium 18,2 mm. Mechanizm ochrony ma charakter wieloskładnikowy: tkanina jednocześnie tłumi strumień promieniowania, ogranicza dostęp tlenu do warstwy pirolizującej i hamuje migrację gazów pożarowych, zachowując integralność przez pierwsze 12 - 20 minut w zależności od wariantu.

Hierarchia skuteczności jest spójna między skalami - wermikulit i „kocówka” wypadają najlepiej w długiej ekspozycji, powłoka aluminiowa dominuje w fazie wstępnej, lecz jej efektywność istotnie spada po degradacji mechanicznej powłoki ok. 12 minuty. Tkaniny o wyższej gramaturze bez modyfikacji powierzchniowej, wykazują największą ciągłość mechaniczną w czasie. Wyniki laboratoryjne mają potwierdzoną moc predykcyjną w zakresie rankingu materiałów; bezwzględne wartości głębokości zwęglenia wymagają korekty eksperymentalnym współczynnikiem skalującym przy przejściu do skali rzeczywistej.

Wykorzystane tkaniny skutecznie opóźniają zwęglenie, co zostało potwierdzone w obu skalach eksperymentalnych. Udowodniono również, przydatność jako rozwiązania zamiennego: przesłanki techniczne są spełnione, jednak ścieżka certyfikacyjna pozostaje warunkiem wdrożenia jako rozwiązania typowego.

Z praktycznego punktu widzenia tkaniny techniczne otwierają dwie ścieżki aplikacyjne dotychczas pozbawione narzędzia: ochronę obiektów zabytkowych (montaż odwracalny, brak ingerencji w substancję historyczną, adaptacja do skomplikowanych geometrii) oraz zabezpieczenie tymczasowe w fazie prac remontowo-budowlanych (możliwe do wprowadzenia w dokumentacji wykonawczej i planie BiOZ, bez konieczności certyfikacji jako rozwiązanie docelowe). Dalsze badania powinny obejmować próby pod obciążeniem mechanicznym, wydłużoną ekspozycję termiczną, analizę trwałości eksploatacyjnej oraz rozszerzenie zakresu materiałowego o drewno liściaste i drewno inżynieryjne (CLT, LVL).

ABSTRACT

Title:

Use of Selected Technical Fabrics Based on Glass Fibre for Fire Protection of Solid Softwood Timber Elements

The growing interest in timber as a structural material — driven by energy-efficient construction and climate pressure favouring low-carbon materials — stands in contrast to a persistent gap in the availability of effective passive fire protection methods for structures with complex geometries or subject to heritage conservation requirements. Conventional technologies such as board linings, spray-applied materials, intumescent coatings, and impregnation treatments fail particularly in historic roof structures and open timber ceilings, where intervention in the historic fabric is excluded yet fire risk is highest.

A systematic literature review revealed an absence of dedicated research on technical glass-fibre fabrics used as standalone external thermal barriers on load-bearing solid softwood elements under internal fire conditions. Although the material has long been proven in fire curtains, fire blankets, and protective clothing, it had not previously been evaluated in this role — a precisely identified research gap that justifies the scope of the study.

The work is based on an original, three-level experimental programme. At the laboratory level, two bespoke test rigs were designed and built: one using an infrared radiant panel array (radiative exposure) and one combining a gas burner with radiant panels (combined exposure). Solid softwood specimens were shielded by four fabric variants: (A) vermiculite-modified glass fabric, (B) single-sided aluminium-coated glass fabric, (C) plain glass fabric ECTS 530 g/m², (D) plain glass fabric 560 g/m² — each tested against an unprotected reference specimen. At the full-scale level, a field fire trial was conducted to verify the laboratory findings and assess the practical suitability of the materials for protecting timber elements. The third level comprised a computational fluid dynamics (CFD) analysis in the FDS/PyroSim environment, serving a validation and comparative role.

Every fabric variant effectively reduced the char depth at both scales: 45–60 % in the laboratory and 23–43 % at full scale. Absolute values after a 30-minute field exposure

were: reference specimen 23.6 mm, vermiculite fabric 15.9 mm, coarse-weave fabric ("kocówka") 13.5 mm, aluminium-coated fabric 18.2 mm. The protection mechanism is multifactorial: the fabric simultaneously attenuates the radiative heat flux, limits oxygen access to the pyrolysing layer, and retards the migration of fire gases, maintaining structural integrity for the first 12–20 minutes depending on the variant.

The effectiveness ranking is consistent across scales — the vermiculite-modified and coarse-weave fabrics perform best under prolonged exposure, while the aluminium-coated fabric dominates in the early phase due to high reflectivity, but its effectiveness drops markedly after mechanical degradation of the coating at approximately 12 minutes. Higher-grammage fabrics without surface modification show the greatest mechanical continuity over time. The laboratory results have confirmed predictive power for material ranking; absolute char depth values require correction by an experimentally derived scaling factor when transferring to full scale.

The tested fabrics effectively delay charring — a finding confirmed at both experimental scales. Their suitability as an equivalent solution in passive fire protection has also been demonstrated: the technical prerequisites are met, although the certification pathway remains a prerequisite for adoption as a standard solution.

From a practical standpoint, technical fabrics open two application routes previously lacking an appropriate tool: protection of heritage buildings — reversible installation, no intervention in historic substance, adaptability to complex geometries — and temporary protection during renovation and construction works, which can be introduced through construction documentation and a health-and-safety plan without requiring certification as a permanent solution. Further research should encompass tests under mechanical load, extended thermal exposure, durability analysis under service conditions, and extension of the material range to hardwoods and engineered timber products (CLT, LVL).