

**SCIENTIFIC
STUDIES**

**PRACE
NAUKOWE**

Bartłomiej Sędkak

Bezpieczeństwo pożarowe pionowych przegród przeszklonych

Efekt skali w ocenie odporności ogniowej

Fire safety of vertical glazed partitions
Scale effect in the assessment of fire resistance



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2022

PUBLIKACJE INSTYTUTU TECHNIKI BUDOWLANEJ

obejmują m.in. następujące wydawnictwa:

PRACE NAUKOWE – MONOGRAFIE, ROZPRAWY, STUDIA

INSTRUKCJE, WYTYCZNE, PORADNIKI

WARUNKI TECHNICZNE WYKONANIA I ODBIORU ROBÓT BUDOWLANYCH

PROJEKTOWANIE WEDŁUG EUROKODÓW

RADA PROGRAMOWA WYDAWNICTW ITB

Przewodniczący

Sekretarz

Członkowie

dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. instytutu

inż. Marek Gębarzewski

prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki

prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz

mgr inż. Jan Sieczkowski

dr hab. inż. Wojciech Węgrzyński, prof. instytutu

dr inż. Michał Wójtowicz

**SCIENTIFIC
STUDIES**
Monographs

**PRACE
NAUKOWE**
Monografie

Bartłomiej Sędkak

Bezpieczeństwo pożarowe pionowych przegród przeszklonych

Efekt skali w ocenie odporności ogniowej

Fire safety of vertical glazed partitions
Scale effect in the assessment of fire resistance



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2022

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny	prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI
Zastępcy redaktora naczelnego	prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. instytutu
Sekretarz	dr MICHAŁ GAJOWNIK
Członkowie	dr hab. inż. PAWEŁ LEWIŃSKI, prof. instytutu dr inż. TERESA MOŻARYN mgr inż. JAN SIECZKOWSKI dr inż. EWA SZEWCZAK dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzenci

dr hab. inż. MARCIN KOZŁOWSKI, prof. uczelni
mł. bryg. dr hab. inż. PAWEŁ OGRODNIK, prof. uczelni

Redakcja

dr MICHAŁ GAJOWNIK

Opracowanie komputerowe

AnnGraf ANNA SZELĄG

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2022

*Czteryśta siedemdziesiąta trzecia pozycja
„Prac Naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-8642-2 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Wydawnictw Naukowych

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19

tel.: 22 56 64 208, e-mail: wydawnictwa@itb.pl, www.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	5
<i>Summary</i>	7
<i>Od Autora</i>	9
<i>Symbole i jednostki</i>	11
1. Wprowadzenie	13
1.1. Przeszkłone przegrody przeciwpożarowe	13
1.2. Problem naukowy	16
1.3. Struktura monografii	18
2. Bezpieczeństwo pożarowe przeszklonych ścian działowych	21
2.1. Przeciwpożarowe ściany działowe	21
2.2. Wymagania polskiego prawa budowlanego	21
2.3. Rozwiązania techniczne	23
2.4. Metodyka badań w zakresie odporności ogniowej	27
2.5. Zachowanie się przeszklonych ścian działowych w badaniach odporności ogniowej	50
2.6. Klasyfikacja ogniowa	51
3. Stan wiedzy dotyczącej oceny odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych z uwzględnieniem efektu skali	57
3.1. Analiza dostępnej literatury	57
3.2. Analiza dostępnych badań przeszklonych ścian działowych	77
4. Zakres badań eksperymentalnych oraz przyjęte założenia	79
4.1. Założenia dotyczące badań	79
4.2. Elementy próbne	80
4.3. Pomiary prowadzone podczas badań oraz po ich zakończeniu	82
4.4. Warunki badania	88
5. Wyniki przeprowadzonych badań	91
5.1. Szczelność i izolacyjność ogniowa oraz obserwacje w trakcie badania	91
5.2. Temperatura na nienagrzewanej powierzchni	104

5.3. Temperatura wewnątrz profili	106
5.4. Deformacje	107
5.5. Zmiany mikrostruktury	108
5.6. Analiza wyników badań	118
6. Efekt skali w ocenie odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych	123
6.1. Deformacja przegród w zależności od sztywności słupów . . .	123
6.2. Obliczenie minimalnej sztywności słupa dla danej ściany . .	124
6.3. Obliczenie dopuszczalnej maksymalnej wysokości ścian oraz minimalnego momentu bezwładności przekroju słupa ściany	126
6.4. Współczynnik wyrażający efekt skali w ocenie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych	127
6.5. Algorytm postępowania przy określaniu odporności ogniowej ściany przeszklonej o założonej wysokości	128
7. Podsumowanie i wnioski	131
Bibliografia	135

BEZPIECZEŃSTWO POŻAROWE PIONOWYCH PRZEGRÓD PRZESZKLONYCH. EFEKT SKALI W OCENIE ODPORNOŚCI OGNIOWEJ

Streszczenie

Praca dotyczy zagadnień związanych z odpornością ogniową przeszklonych ścian działowych. Wewnętrzne ściany budynku, które nie stanowią jego konstrukcji, czyli nie mają właściwości nośnych, nazywane są ścianami działowymi. Głównym zadaniem elementów tego typu jest wydzielenie pomieszczeń w budynku, dlatego też powinny być one zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby zapewnić między innymi spełnienie wymagań dotyczących odporności ogniowej. Badanie odporności ogniowej ma na celu ocenę zachowania próbki elementu konstrukcji budowlanej poddanej określonym warunkom nagrzewania i ciśnienia. Pozwala to na ilościową ocenę zdolności elementu do wytrzymania oddziaływania wysokiej temperatury poprzez ustalenie kryteriów, za pomocą których można między innymi ocenić funkcje nośności, zdolności do powstrzymywania ognia (szczelności) i przenoszenia ciepła (izolacyjności).

Metodologia przeprowadzonych badań oparta jest na procedurach badawczych obowiązujących powszechnie w Europie. Określają one minimalne wymiary elementów próbnych, na których należy przeprowadzić badanie. Badania elementów próbnych o minimalnych wymiarach pozwalają na ocenę odporności ogniowej elementów o rozmiarach nieznacznie większych. Nie rozwiązuje to jednak realnego problemu stosowania odpornych ogniowo przeszklonych oddzieleni o wysokości znacznie przewyższającej wymiary ścian zweryfikowanych badawczo. Oznacza to, że w wielu obiektach, głównie użyteczności publicznej, stosowane są rozwiązania, których skuteczność ochrony przed działaniem ognia nie została potwierdzona badaniami.

W monografii opracowano model umożliwiający, na podstawie badań elementów próbnych o wymiarach 3×3 m, ocenę odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych wykonanych z profili aluminiowych o wymiarach znacznie je przewyższających. Model został opracowany na podstawie wyników badań ośmiu elementów próbnych przeszklonych ścian działowych. Do badań wytypowano ścianki najczęściej spotykane na polskim rynku – słupowo-ryglowe przeszklone ściany działowe o aluminiowych profilach trzykomorowych.

Dodatkowo w pracy zostały przedstawione wymagania polskiego prawa budowlanego związane z odpornością ogniową przeszklonych ścian działowych, procedura badania oraz sposób klasyfikacji elementów tego typu, jak również stosowane w nich rozwiązania konstrukcyjne. Ponadto szeroko omówiono literaturę związaną z tematyką monografii.

Najważniejszy wniosek przedstawiony w monografii dotyczy możliwości oszacowania według wyprowadzonych w pracy wzorów oraz badania próbki o minimalnych wymiarach normowych – maksymalnej dopuszczalnej wysokości przeszklonej ściany aluminiowej dla danego przekroju aluminiowego profilu, jak również wyznaczenia minimalnego wymaganego momentu bezwładności przekroju profilu, dla którego ścianka o danej wysokości zachowa swoją odporność ogniową. Na podstawie wymaganego minimalnego przekroju profilu aluminiowego jest możliwe dobranie odpowiednich profili wzmacniających.

Monografia składa się z 7 rozdziałów. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do omawianej tematyki, przedstawia problem naukowy oraz zakres pracy. W rozdziale 2 omówiono stan wiedzy na temat bezpieczeństwa pożarowego przeszklonych ścian działowych. Rozdział 3 poświęcony został analizie dostępnej literatury oraz analizie wybranych raportów z badań w zakresie odporności ogniowej. W rozdziale 4 przedstawiono przyjęte założenia dotyczące badań eksperymentalnych. W rozdziale 5 omówiono wyniki przeprowadzonych badań, natomiast w rozdziale 6 znajduje się rozwiązanie problemu naukowego postawionego na początku pracy. W rozdziale 7 zawarto podsumowanie wraz z wnioskami wynikającymi z przeprowadzonych badań.

FIRE SAFETY OF VERTICAL GLAZED PARTITIONS. SCALE EFFECT IN THE ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE

Summary

The monograph concerns the issue of fire resistance of glazed partition walls. The internal walls of the building, which are not its structure, and therefore do not have load-bearing properties, are called partition walls. The main task of this type of elements is to separate the rooms in the building, which is why they should be designed and constructed in such a way to ensure, inter alia, that the fire resistance requirements are met. The fire resistance test aims to assess the behavior of a sample of a building structure subjected to specific heating and pressure conditions. It allows a quantitative assessment of the ability of an element to withstand the effects of high temperature by setting criteria that can be used to assess, among other things, the loadbearing capacity, fire retardancy (integrity) and heat transfer (insulation) functions. Fire-resistance testing procedures for glazed partitions used in Europe determine the minimum dimensions of the test items (2.8×3.0 m, width × height in the furnace opening lumen). Tests on minimum-sized items enable the evaluation of the fire resistance of slightly larger components. Nonetheless, they do not address the real problem of using fire-resistant glazed partitions, whose heights significantly exceed the dimensions of partitions verified in tests. This means that in many facilities, mainly public utilities, solutions are used whose effectiveness of protection against fire has not been confirmed in tests.

This monograph resulted in the development of a model based on testing minimum-sized items, enabling the fire resistance evaluation of aluminium glazed partitions that are much higher than the test items. A typical scale effect should be expected in this situation, resulting from the difference in the dimensions of the test sample and the actual glass partition. The model was developed based on the results of eight tests on glazed partitions. The monograph also contains information on the requirements of Polish construction law related to the fire resistance of glazed partition walls, the test methodology and procedure of classification of elements of this type, as well as the structural solutions used in them. In addition, literature related to the

topic of work was widely discussed. The most important conclusion drawn on the basis of the research carried out as part of this dissertation concerns the possibility of estimating on the basis of the formulas derived from the study and test of sample with minimum standard dimensions, the maximum permissible height of the aluminium glazed partition for a given section of an aluminum profile, as well as determining the minimum required moment of inertia of the section of a profile for which wall of a given height will retain its fire resistance. On the basis of the required minimum cross-section of the aluminum profile it is possible to select appropriate reinforcing profiles.

OD AUTORA

Monografia została opracowana na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Efekt skali w ocenie odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych” [1], z uwzględnieniem uwag recenzentów oraz dyskusji w trakcie publicznej obrony. W założeniu praca ma stanowić praktyczne kompendium wiedzy dotyczące bezpieczeństwa pożarowego pionowych przegród przeszklonych ze szczególnym uwzględnieniem aspektów związanych z efektem skali w ocenie ich odporności ogniowej. Opracowanie niniejszej monografii nie byłoby możliwe bez pomocy kilku osób, którym pragnę w tym miejscu podziękować. Dziękuję przede wszystkim Dyrekcji Instytutu Techniki Budowlanej za umożliwienie zrealizowania unikatowych badań wielkogabarytowych elementów próbnych. Wyrazy wdzięczności kieruję także w stronę promotora – prof. dr. hab. inż. Andrzeja Garbacza oraz promotora pomocniczego – dr. inż. Pawła Sulika, bez których wsparcia przebycie ścieżki od postawienia problemu naukowego do jego rozwiązania nie byłoby możliwe. Pragnę podziękować także recenzentom, dr. hab. inż. Marcinowi Kozłowskiemu, prof. PŚ oraz mł. bryg. dr. hab. inż. Pawłowi Ogródnikowi, prof. SGSP, za dokładną analizę pracy oraz cenne uwagi.

Bartłomiej Sędlak

SYMBOLE I JEDNOSTKI

- b_s – współczynnik wyrażający efekt skali, n.d.
- E – moduł Younga; dla aluminium przyjęto $E = 69,5 \times 10^9$ [Pa]
- f – ugięcie wynoszące 1 m
- H – wysokość danego słupa [m]
- H_b – wysokość zbadanej ściany o minimalnych wymiarach [m]
- H_{\max} – maksymalna dopuszczalna wysokość ścian dla słupa o określonym momencie bezwładności [m]
- H_s – wysokość ściany, dla której określony jest minimalny moment bezwładności przekroju słupa [m]
- J – moment bezwładności przekroju danego słupa [m⁴]
- J_{\min} – wymagany minimalny moment bezwładności słupa dla danej wysokości ściany [m⁴]
- J_s – moment bezwładności przekroju słupa, dla którego określana jest wysokość maksymalna [m⁴]
- K – sztywność słupa [N/m]
- K_b – sztywność słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [N/m]
- K_{\min} – minimalna sztywność słupa ściany, dla której zachowana zostanie klasa odporności ogniowej [N/m]
- u – ugięcie słupa [m]
- u_b – ugięcie słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [m]
- u_{\max} – przewidywane maksymalne ugięcie słupa ściany o minimalnej sztywności [m]

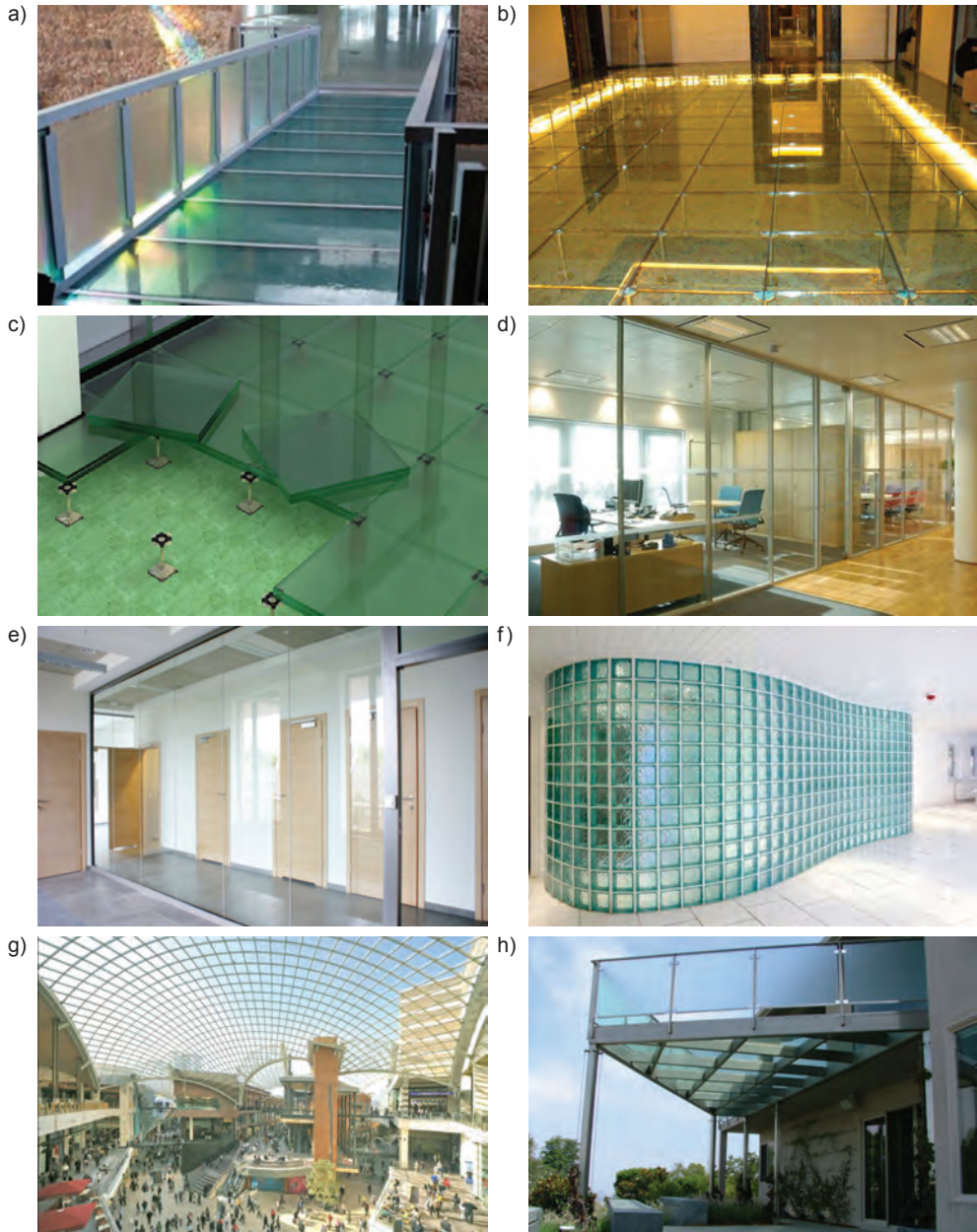
1. WPROWADZENIE

1.1. Przeszkłone przegrody przeciwpożarowe

Powierzchnie przeszklone stanowią jeden z najbardziej charakterystycznych elementów otaczającej nas nowoczesnej architektury [2]–[5]. W budynkach biurowych, usługowych czy też użyteczności publicznej, takich jak szpitale, kina, szkoły lub galerie handlowe oraz w budynkach o znaczącej wysokości [5]–[7] dominującą rolę odgrywają przegrody, w których szkło stanowi główny element składowy. Zarówno w przypadku zewnętrznych powłok budynków, jak i przestrzeni wewnętrznych, powszechność przeszkleń jest uderzająca.

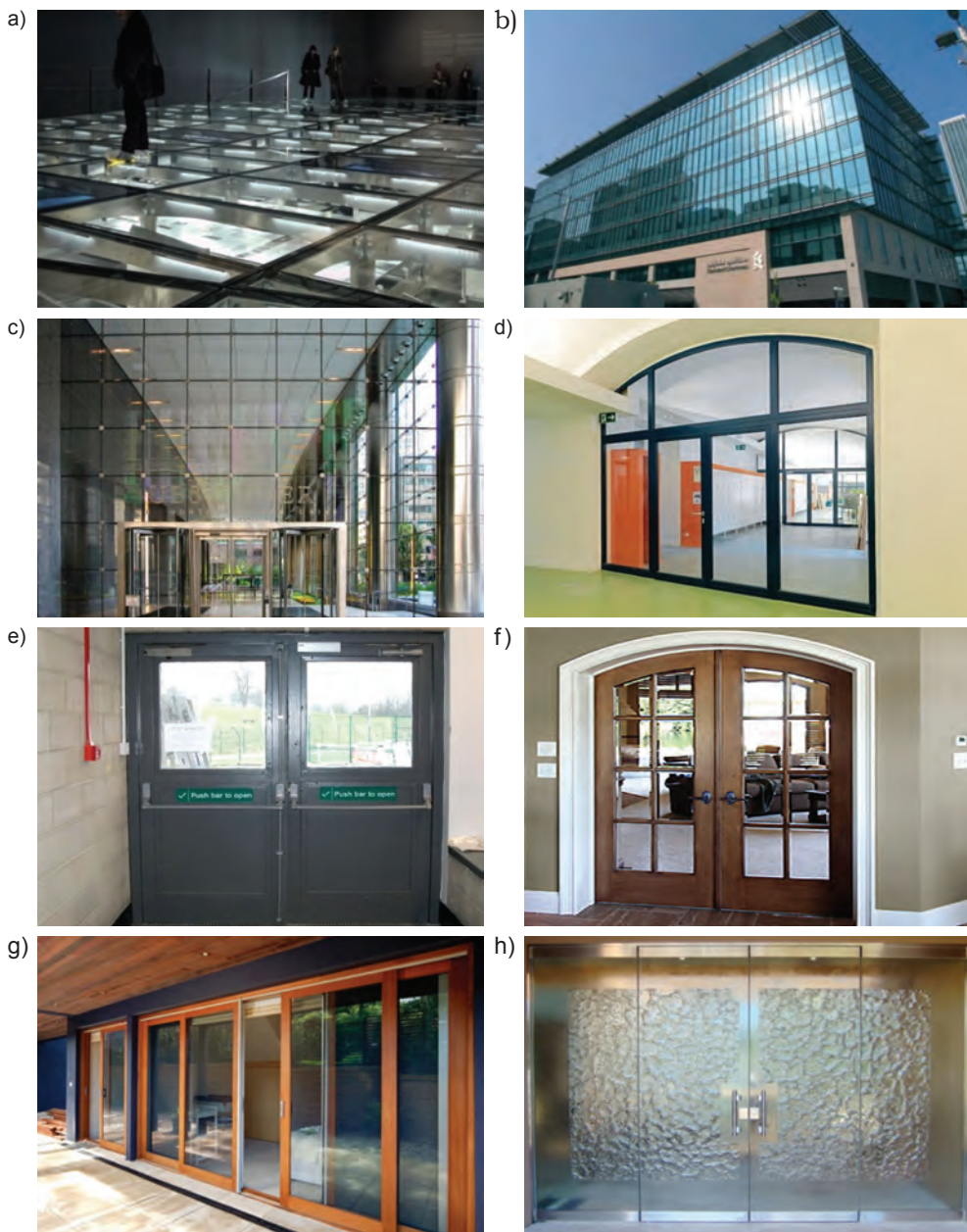
Coraz częstsze wykorzystanie szkła we współczesnym budownictwie ma swoje uzasadnienie. Jest to materiał pozwalający na kształtowanie powierzchni użytkowych z maksymalnym wykorzystaniem światła dziennego, a współczesne technologie umożliwiają eliminację niekorzystnych wpływów atmosferycznych, zapewniając jednocześnie niezbędny komfort i intymność. Wciąż wzbogacany wachlarz rozwiązań konstrukcyjnych, nad którego udoskonalaniem nieustannie pracują wyspecjalizowane biura techniczne właścicieli danych systemów, pozwala na stosowanie tego typu konstrukcji w wielu, często wyjątkowo widowiskowych formach. Ponadto, nowoczesne elewacje wykorzystujące szkło pozwalają również na efektywne energetycznie rozwiązania, łącznie z pozyskiwaniem energii z promieniowania słonecznego.

Elementy, w których dominującym materiałem jest szkło, stanowią zarówno wewnętrzne przegrody budynków [8]–[10], jak również ich zewnętrzne poszycie [11]–[13], mocowane są w pionie [14]–[19] oraz ukośnie lub poziomo [20], [21]. Przykładowe zastosowania elementów przeszklonych w praktyce zaprezentowano na rysunkach 1 i 2. Wśród przegród przeszklonych najczęstsze zastosowanie w budownictwie mają drzwi [10], [15], [26]–[35], [16], [36]–[45], [17], [46]–[49], [18], [19], [22]–[25] i okna [50], [51], ściany osłonowe [3], [5], [19], [28], [52]–[59], [11], [60]–[69], [12], [70]–[72], [13]–[18], świetliki (dachy przeszklone) [20], [21] oraz będące przedmiotem niniejszej pracy ściany działowe [8], [9], [71], [73]–[81], [14], [82]–[91], [15], [92], [16]–[19], [28], [67].



Rys. 1. Przykładowe zastosowania przegród przeszklonych
 a) kładka, b) podłoga podniesiona, c) podłoga podniesiona, d) przeszklona ściana
 działowa, e) przeszklona ściana działowa bezszprosowa, f) ściana działowa
 z pustaków szklanych, g) dach przeszklony (świetlik), h) balkon przeszklony [21],
 [74], [93]

1.1. PRZESZKLONE PRZEGRODY PRZECIWPOŻAROWE



*Rys. 2. Przykładowe zastosowania przegród przeszklonych
a) szklany strop, b) przeszklona ściana osłonowa słupowo-ryglowa, c) przeszklona ściana osłonowa z połączeniami strukturalnymi, d) stalowe profilowe drzwi przeszklone z przeszklonymi panelami górnymi i bocznymi, e) stalowe płaszczowe drzwi przeszklone, f) drewniane drzwi przeszklone, g) drewniane przesuwne drzwi przeszklone, h) drzwi „całoszklane” [93]*

Głównym zadaniem przeszklonych ścian działowych jest wydzielenie pomieszczeń w budynku, dlatego też powinny być one zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby zapewniały między innymi spełnienie wymagań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego, w tym także tych związanych z odpornością ogniową.

1.2. Problem naukowy

Określenie rzeczywistej klasy odporności ogniowej ścian przeszklonych, z uwagi między innymi na to, że konstrukcje tego typu są z reguły niejednorodne i często składają się z wielu dodatkowych komponentów, można uzyskać wyłącznie na drodze badawczej, spełniając wymagania normowe.

Badanie odporności ogniowej ma na celu ocenę zachowania próbnego elementu konstrukcji budowlanej poddanego określonym warunkom nagrzewania i ciśnienia. W oparciu o ustalone kryteria prowadzi się ilościową ocenę odporności elementu na oddziaływanie wysokiej temperatury, między innymi jej wpływu na nośność, zdolność do powstrzymywania ognia (szczelność) i przenoszenia ciepła (izolacyjność).

Procedury badawcze z zakresu odporności ogniowej ścian działowych stosowane w Europie określają minimalne wymiary elementów próbnych ($2,8 \times 3,0$ m, szerokość \times wysokość w świetle otworu pieca), na których przeprowadzić należy badanie. Z uwagi na duże koszty badań laboratoryjnych, związane przede wszystkim z koniecznością posiadania pieca o odpowiednich gabarytach, jak również z kosztem przygotowania samej próbki, dostępność pieców o wymiarach w świetle otworu większych niż $3,0 \times 3,0$ m jest bardzo ograniczona.

Badania elementów próbnych o minimalnych wymiarach pozwalają na ocenę odporności ogniowej elementów o nieznacznie większych wymiarach. Nie rozwiązuje to jednak realnego problemu stosowania odpornych ogniowo przeszklonych oddzieleń o wysokości znacznie przewyższającej wymiary ścian zweryfikowanych badawczo. Oznacza to, że w wielu obiektach, głównie użyteczności publicznej, stosowane są rozwiązania, których skuteczność ochrony przed działaniem ognia nie została potwierdzona w badaniach. Celem niniejszej pracy jest opracowanie algorytmu umożliwiającego rozszerzenie oceny odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych.

Problemem naukowym jest opracowanie modelu umożliwiającego, na podstawie badań elementów próbnych o wysokości 3 m, ocenę odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych wykonanych z profili aluminiowych o wysokości przekraczającej 3 m. W takiej sytuacji spodziewać się

należy typowego efektu skali wynikającego z różnicy wymiarów próbki modelowej i rzeczywistej przegrody szklanej. Zjawisko efektu skali powoduje, że wyniki badań doświadczalnych prowadzonych na elementach w skali laboratoryjnej zazwyczaj nie są prawdziwe dla elementów rzeczywistych. Oryginalność rozwiązania problemu naukowego w niniejszej monografii polega na ocenie wpływu efektu skali na uzyskane wyniki odporności ogniowej przeszklonych ścian słupowo-ryglowych. Wyznaczona na podstawie przeprowadzonych eksperymentów zależność korelacyjna pozwala na szacowanie odporności ogniowej ścian o wymiarach znacząco przekraczających gabaryty elementów próbnych poddawanych badaniom w najpopularniejszych typach pieców ($3,0 \times 3,0$ m w świetle otworu). Badania tego rodzaju pozwalają na klasyfikowanie ścian wyłącznie do wysokości 3,6 m [75], podczas gdy istnieje konieczność określenia odporności ogniowej dla ścian o zdecydowanie większej wysokości.

Wyznaczona zależność korelacyjna, zwalidowana w badaniach eksperymentalnych, pozwala na określenie na podstawie testów elementów o wymiarach minimalnych (zgodnie z przyjętą procedurą próbek o wysokości 3 m), następujących wartości:

- maksymalnej dopuszczalnej wysokości ściany o analogicznej konstrukcji, dla której zachowana zostanie odporność ogniowa określona w badaniu ściany o wymiarach minimalnych (3,0 m),
- minimalnej dopuszczalnej sztywności słupa ściany wymaganej dla przegrody o danej wysokości w celu zachowania odporności ogniowej określonej w badaniu ściany o wymiarach minimalnych (3,0 m).

Dodatkowo przeprowadzono badania zmian mikrostruktury i właściwości profili aluminiowych poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury. Początkowo zakładano, że będzie możliwe powiązanie uzyskanych wyników z temperaturą na powierzchni profili lub z deformacją, zarejestrowanymi podczas badania odporności ogniowej elementów próbnych, co umożliwiłoby określenie dodatkowych warunków dotyczących oceny odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych wykonanych z profili aluminiowych o wysokości przekraczającej 3 m. Pomimo, iż uzyskane wyniki były niezależne od temperatury oraz deformacji, stwierdzono, że są one warte przedstawienia w niniejszej monografii.

Z uwagi na duże zróżnicowanie rodzajów przeszklonych ścian działowych, co zostało szerzej opisane w rozdziale 2.3, monografia poświęcona została jednemu z najczęściej spotykanych typów przeszklonych ścian działowych, tj. słupowo-ryglowym ścianom wykonanym z trzykomorowych profili aluminiowych, ze środkową komorą zabezpieczoną wkładem izolacyjnym.

1.3. Struktura monografii

W pierwszym rozdziale pracy w sposób ogólny nakreślono istotę problemu związanego z oceną odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych o rozmiarach znacznie przekraczających minimalne wymiary elementów próbnych określone w normach badawczych. W rozdziale zwrócono też uwagę na znaczenie efektu skali w ocenie odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych, uzasadniając w ten sposób zasadność podjęcia omawianego problemu badawczego.

W drugim rozdziale przedstawiony został stan wiedzy na temat bezpieczeństwa pożarowego przeszklonych ścian działowych. Omówiono w nim wymagania polskiego prawa budowlanego, rozwiązania konstrukcyjne stosowane w przeszklonych ścianach działowych oraz metodykę ich badania i sposób klasyfikacji w zakresie odporności ogniowej.

Rozdział trzeci poświęcony został analizie dostępnej literatury powiązanej z tematyką pracy oraz analizie wybranych raportów z badań w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych dostępnych w archiwum Zakładu Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej. Przedstawiono także szczegółowe wyniki badań wybranych ścian działowych. W części poświęconej literaturze omówiono historię badań odporności ogniowej w oparciu o dotychczasowy dorobek publikacyjny oraz przedstawiono analizę artykułów dotyczących wymagań norm europejskich i polskiego prawa budowlanego, zachowanie przeszklonych ścian działowych o różnej konstrukcji w warunkach pożaru oraz publikacje poświęcone przeszkle- niom przeciwpożarowym.

W rozdziale czwartym zaprezentowano zakres oraz przyjęte założenia dotyczące autorskich badań eksperymentalnych, a także dokładny opis konstrukcji każdego z ośmiu elementów próbnych aluminiowych przeszklonych ścian działowych poddanych badaniom. Ponadto omówiono pomiary przeprowadzone podczas badań, związane ze szczelnością ogniową, przyrostem temperatury na nienagrzewanej powierzchni badanych elementów oraz wewnątrz profili aluminiowych, jak również deformacją próbek. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawione zostały w rozdziale piątym.

W rozdziale szóstym znajduje się rozwiązanie problemu naukowego postawionego we wstępie monografii. Wykazano konieczność uwzględnienia efektu skali w ocenie odporności ogniowej ścian oraz przedstawiono zależność deformacji przegród od sztywności słupów stanowiących ich konstrukcję. Wyprowadzone zostały wzory umożliwiające wyznaczenie minimalnej sztywności słupa dla ściany o danej wysokości i dopuszczalnej

maksymalnej wysokości ścian oraz minimalnego momentu bezwładności przekroju słupa ściany. Na podstawie wyprowadzonych wzorów został określony algorytm postępowania przy ocenie odporności ogniowej ścian o określonej wysokości. Dzięki przeprowadzonym analizom wyznaczono współczynnik określający efekt skali w ocenie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych.

W podsumowaniu zawarto wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

2. BEZPIECZEŃSTWO POŻAROWE PRZESZKLONYCH ŚCIAN DZIAŁOWYCH

2.1. Przeciwpozarowe ściany działowe

Wewnętrzne ściany budynku, które nie stanowią jego konstrukcji, czyli nie mają właściwości nośnych, nazywane są ścianami działowymi. Głównym zadaniem elementów tego typu jest wydzielenie pomieszczeń w budynku, dlatego też powinny być one zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby zapewnić między innymi spełnienie wymagań dotyczących odporności ogniowej. Wymagania te zestawione zostały w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [94] – jako drugie po nośności i stateczności wymagania podstawowe dotyczące obiektów budowlanych.

Ściany działowe mające odpowiednią klasę odporności ogniowej wykonywane są najczęściej jako ścianki w lekkiej zabudowie, usztywnione stalowym lub drewnianym stelażem, z okładziną wykonaną np. z płyt gipsowo-kartonowych [95]–[97] lub płyt drewnopochodnych [98], [99], ewentualnie ścianki murowane z lekkich drobnowymiarowych elementów [100]–[103], czy też wykonywane z płyt warstwowych [104]–[107]. Materiały te, pomimo swoich bardzo dobrych właściwości umożliwiających powstrzymanie ognia są, ze względów estetycznych, coraz częściej zastępowane przegrodami przeszklonymi. Dzięki zastosowaniu w swej konstrukcji odpowiednich materiałów, pozwalają one na znaczne ograniczenie oddziaływania wysokiej temperatury spowodowanej pożarem.

2.2. Wymagania polskiego prawa budowlanego

Wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego budynków, w tym przeszklonych ścian działowych, zestawione zostały w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. [94]. Budynki zgodnie z rozporządzeniem [94] powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku wystąpienia pożaru zapewnić:

- nośność konstrukcji przez określony czas,
- ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru wewnątrz obiektu oraz na budynki sąsiednie,
- możliwość ewakuacji użytkowników,
- bezpieczeństwo ekip prowadzących akcję ratowniczą.

Poziom wymaganego bezpieczeństwa dla danego obiektu zależny jest od wielu czynników, takich jak na przykład przewidywany sposób jego użytkowania (ZL I – V – kategorie zagrożenia ludzi), czy też jego wysokość lub liczba kondygnacji. Dlatego też w rozporządzeniu [94] ustanowione zostało pięć klas odporności pożarowej budynków, oznaczonych literami od „A” (najwyższe wymagania) do „E” (najniższe wymagania), do których zaliczony może być dany obiekt lub jego część.

W celu spełnienia stawianych wymagań ściany działowe powinny być (w większości przypadków) elementami nierozprzestrzeniającymi ognia oraz mieć odpowiednią klasę odporności ogniowej. Zgodnie z rozporządzeniem [94] dopuszcza się zastosowanie ścian działowych słabo rozprzestrzeniających ogień w przypadku budynków o jednej kondygnacji i kategorii zagrożenia ludzi ZL IV, budynków magazynowych o maksymalnej gęstości obciążenia ogniowego strefy pożarowej do 500 MJ/m^2 , lub magazynowych niskich o maksymalnej gęstości obciążenia ogniowego strefy pożarowej do 1000 MJ/m^2 .

W zależności od klasy odporności pożarowej budynku wymagania w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych określone są poprzez wyznaczenie minimalnych klas odporności ogniowej EI i E, określonych zgodnie z normą EN 13501-2 [108] na podstawie badania wykonanego zgodnie z normą EN 1364-1 [109]. Wymagane klasy odporności ogniowej ścian działowych określone w rozporządzeniu [94], w przypadku różnych klas odporności pożarowej budynku, zestawione zostały w tablicy 1.

Tablica 1. Wymagania w zakresie odporności ogniowej zawarte w rozporządzeniu [94]

Klasa odporności pożarowej budynku	Klasa odporności ogniowej ściany działowej
A	EI 60
B	EI 30
C	EI 15
D	(-)
E	(-)

E – szczelność ogniowa (w minutach), określona zgodnie z Polską Normą dotyczącą zasad ustalania klas odporności ogniowej elementów budynku.
 I – izolacyjność ogniowa (w minutach), określona jw.
 (-) – nie stawia się wymagań.

Tablica 1 ma charakter ogólny, w polskich przepisach budowlanych [94] określono odstępstwa oraz klasy odporności ogniowej pionowych elementów przeszklonych stosowanych w szczególnych przypadkach.

2.3. Rozwiązania techniczne

Przeszkłone ściany działowe wykonywane są najczęściej jako konstrukcje szkieletowe, w których przestrzenie pomiędzy metalowymi [72], [77], [89], [91], [110] lub drewnianymi [81], [84] profilami wypełniane są matowymi, lub przeziernymi przeszklzeniami.

Profile, z których wykonane są ściany działowe, najczęściej mają symetryczny przekrój. Metalowe składają się z kształtowników połączonych przekładką termiczną, a drewniane wykonane są z litego lub klejonego drewna i stanowić mogą element pojedynczy lub złożony z kilku warstw sklejonych ze sobą przy użyciu specjalnego kleju.

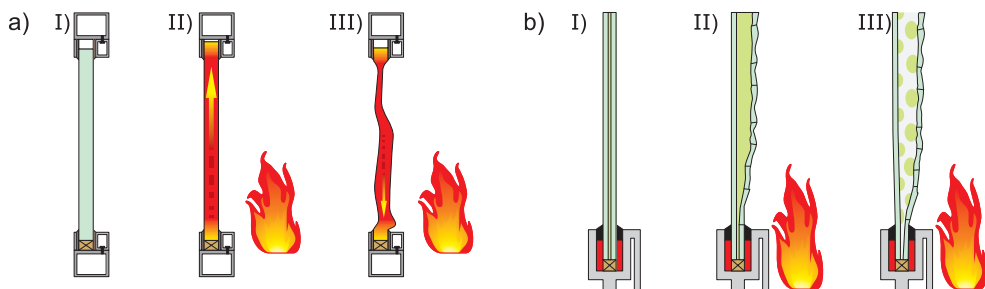
Przeszklenie instalowane jest zazwyczaj w środku grubości profilu przy użyciu specjalnych stalowych kątowników mocowanych do profili szkieletu za pomocą stalowych wkrętów lub nitów. Bardzo ważny jest odpowiedni rozstaw elementów mocujących szyby oraz odległość pierwszego zamocowania od naroża danego przeszklenia. Błędny dobór elementów mocujących lub ich rozstawu może znacząco obniżyć odporność ogniową całej konstrukcji [111]. Po obwodzie przeszklenia do profili mocowane są specjalne uszczelki pęczniące, wykonane z grafitu ekspandującego [112]–[115], które pod wpływem temperatury zwiększają swoją objętość, dzięki czemu zamykają przestrzenie przez które mógłby przedostać się ogień. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że istnieją na rynku rozwiązania, w których ww. uszczelki nie są stosowane, a przestrzeń pomiędzy profilem a wypełnieniem zamykana jest w trakcie pożaru poprzez pęczniący żel znajdujący się w przeszkleniu. Całe mocowanie ukryte jest pod przykręcaną lub wpinaną listwą przyszybową wykonaną najczęściej z tego samego materiału co profil podstawowy.

W przypadku profili metalowych bardzo istotne jest odpowiednie zaizolowanie kształtownika. Wewnątrz profili umieszczane są specjalne wkłady izolacyjne wykonane najczęściej z płyt gipsowo-kartonowych, silikatowo-cementowych, krzemianowo-wapniowych lub glino-krzemianowych, chociaż na rynku obecne są również rozwiązania z wypełnieniem drewnianym [85], [86]. Rodzaj wkładu izolacyjnego oraz sposób wypełnienia profilu mają ogromny wpływ na klasę odporności ogniowej danej przegrody, co przedstawione zostało w artykułach [89], [91].

Coraz częściej spotykanym na rynku rozwiązaniem są bezszprosowe ściany działowe [78], [90], [92], w których profile występują tylko po obwodzie ściany, słupy zastąpione są specjalnym silikonem ognioodpornym lub uszczelką pęczniącą, a rygle w większości przypadków w ogóle nie występują. Istnieją również rozwiązania, w których przeszklenie mocowane jest bezpośrednio do konstrukcji mocującej, a mocowanie zabezpieczane jest przed działaniem

ognia i wysokiej temperatury poprzez paski płyt, np. gipsowo-kartonowych, silikatowo-cementowych, krzemianowo-wapniowych lub glino-krzemianowych.

Jako przeszklenia ścian działowych o określonej klasie odporności ogniowej stosowane są specjalne szyby ogniochronne [116]–[118]. W zależności od oczekiwanej klasy odporności ogniowej mogą być one wykonane jako warstwowe [119], [120] lub monolityczne [121], [122]. Szyby monolityczne stosowane są zazwyczaj w elementach nieposiadających klasy izolacyjności ogniowej. Wykonane są z jednej tafli szkła sodowo-wapniowo-krzemianowego lub boro-krzemianowego, która może być dodatkowo zbrojona stalową siatką. Szyby warstwowe wykonane są z dwóch lub kilku tafli szklanych, oddzielonych specjalnym żelutem pęczniejącym pod wpływem temperatury. Dzięki właściwościom żelutów szyby tego typu stosowane być mogą w przegrodach, którym stawiane są wymagania dotyczące szczelności i izolacyjności ogniowej. Na rysunku 3 przedstawiony został sposób zachowania szyb danego rodzaju w warunkach pożaru.

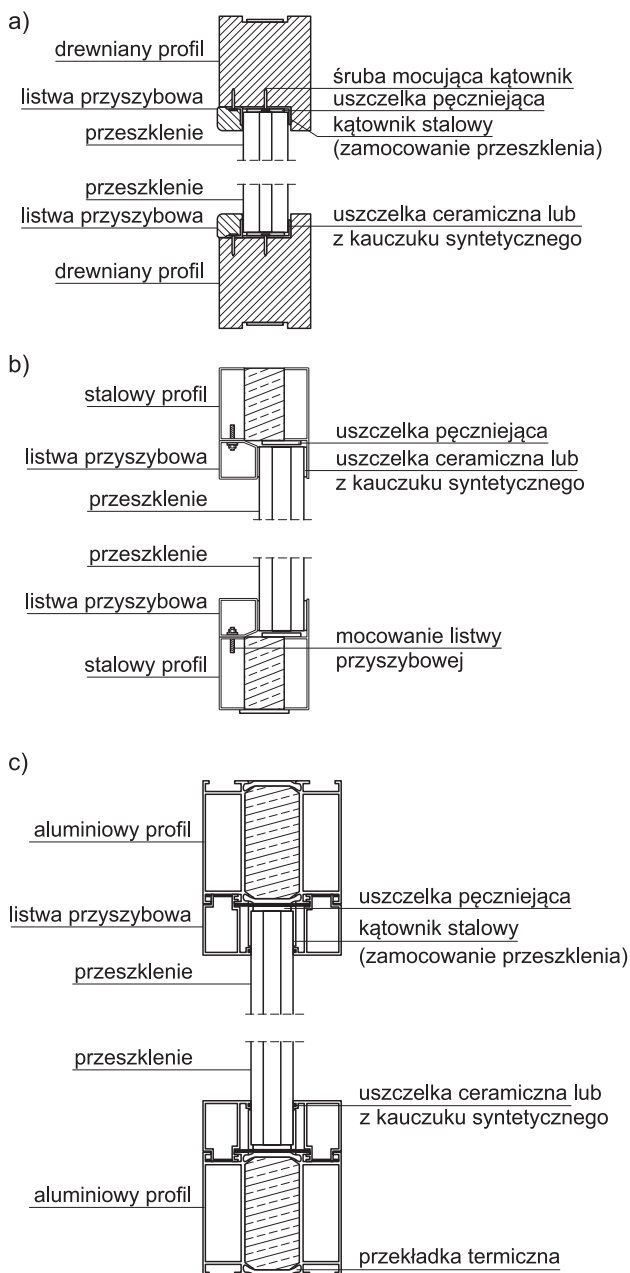


Rys. 3. Zachowanie w warunkach pożaru

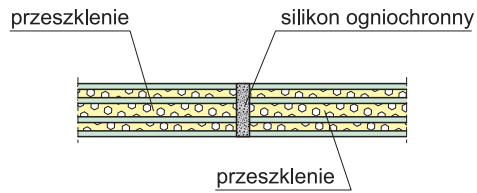
a) szyby monolitycznej, b) szyby warstwowej; I – przed pożarem, II – po 10 minutach nagrzewania, III – po 30 minutach nagrzewania [73]

Innym rozwiązaniem, w którym szkło jest podstawowym materiałem składowym, są ściany działowe wykonane z pustaków szklanych [80]. Pustaki szklane stosowane w ognioodpornych ścianach działowych wykonywane są z grubej warstwy szkła (zazwyczaj ok. 20 mm). Ich wymiary, a w szczególności grubość całego pustaka, zależne są od oczekiwanej klasy odporności ogniowej. Elementy szklane łączone są przy użyciu specjalnych zapraw murarskich. Grubość spoiny wynosi zazwyczaj około 10 mm, a pomiędzy poszczególnymi rzędami i kolumnami umieszczane są pręty zbrojeniowe. Po obwodzie ściany działowej z pustaków szklanych wykonane są dylatacje z wełny mineralnej, umieszczonej (razem z częścią pustaka) np. w specjalnie wykonanym wrębie w konstrukcji mocującej.

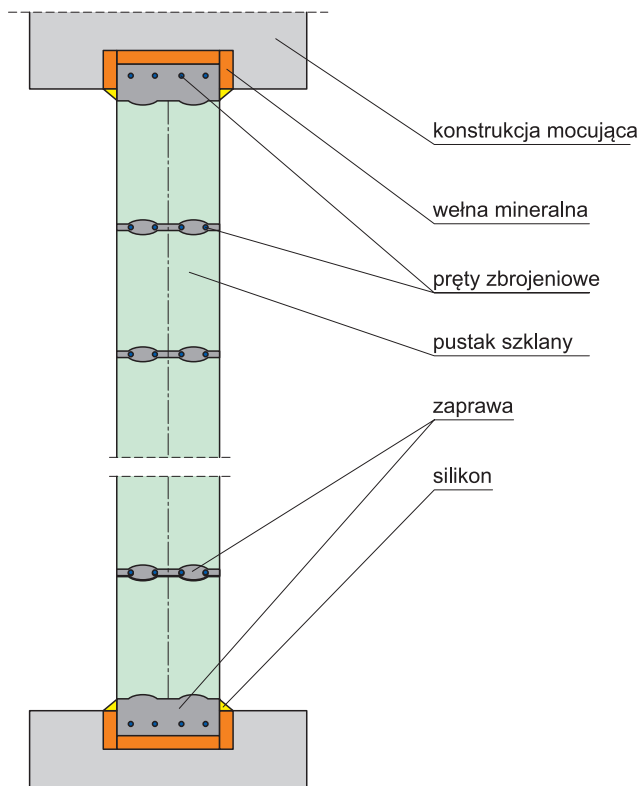
Na rysunkach 4–6 przedstawiono przekroje przez poszczególne omówione wyżej rozwiązania.



Rys. 4. Przekrój przez przykładowy profil
 a) drewniany, b) stalowy, c) aluminiowy [83]



Rys. 5. Przekrój przez przykładowe połączenie przeszkleń w ścianie bezszprosowej [83]



Rys. 6. Przekrój przez przykładową ścianę działową z pustaków szklanych [83]

2.4. Metodyka badań w zakresie odporności ogniowej

2.4.1. Element próbny

Badania odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych przeprowadzane są na elementach próbnym, które wykonane być mogą jako w pełni reprezentatywne do tych zastosowanych (lub planowanych do zastosowania) w praktyce lub w sposób zapewniający najszerszy zakres zastosowania wyników badania.

W pierwszym przypadku na stanowisku badawczym montowany jest element identyczny pod względem budowy i wymiarów z tym, który jest lub ma być zamontowany w danym obiekcie. Istotne jest tutaj odwzorowanie rzeczywistego sposobu zamocowania elementu próbnego oraz dobranie konstrukcji mocującej odpowiadającej tej, w której element zamontowany będzie w praktyce.

W drugim przypadku element próbny do badania odbiega w znacznym stopniu od tych wykorzystywanych w praktyce, ale dzięki zastosowaniu w nim różnych kombinacji połączeń oraz odpowiednich wymiarów, możliwe jest przeniesienie wyników badań na szereg konstrukcji podobnych. Istotny w tym przypadku jest dobór odpowiedniej wysokości, ponieważ będzie ona miała wpływ na tą, która dopuszczona zostanie w klasyfikacji ogniowej. Wysokość może być również ograniczona przez możliwości danego laboratorium badawczego. Jak wspomniano wcześniej, w standardowych piecach do badań odporności ogniowej możliwe jest przebadanie elementów sięgających 3 m wysokości. Kolejną istotną sprawą jest szerokość próbki – jeżeli w praktyce stosowane mają być elementy o szerokości przekraczającej 3 m, należy do badania przygotować element próbny o szerokości nie mniejszej niż 2,8 m, z jedną pionową krawędzią swobodną (niezamocowaną). Wolna krawędź o szerokości od 0,025 m do 0,050 m wypełniana jest szczelnie wełną mineralną w taki sposób, aby pozwolić na swobodne odkształcanie się krawędzi pod wpływem działania ognia.

Na rysunku 7 przedstawiono przykłady elementów próbnym przeszklonych ścian działowych przed badaniem w zakresie odporności ogniowej.



Rys. 7. Element próbny

a) aluminiowej, profilowej, przeszklonej ściany działowej, b) drewnianej przeszklonej ściany działowej, c) bezszprosowej przeszklonej ściany działowej, d) ściany działowej z pustaków szklanych [78]–[80], [84]

Prawidłowo zaprojektowany element próbny powinien zawierać przeszklenia o maksymalnych przewidzianych do stosowania wymiarach (zarówno w pionie, jak i w poziomie). Przeszklenie o największych wymiarach powinno być zamocowane pomiędzy wewnętrznymi słupami lub po stronie krawędzi swobodnej. Należy zwrócić uwagę również na to, że w jednym elemencie próbnym możliwe jest zastosowanie tylko jednego rodzaju przeszklenia. W konstrukcji elementu próbnego należy zastosować wszystkie możliwe rodzaje połączeń, które wykorzystane będą w praktyce. Zasada ta dotyczy również wszelkich szprosów umieszczonych pod różnymi kątami oraz profili w kształcie łuków.

Przeszkłone ściany działowe często wyposażone są w drzwi, którym również stawiane są wymagania dotyczące odporności ogniowej oraz w niektórych przypadkach także dymoszczelności. Elementy te również podlegają badaniu w zakresie odporności ogniowej i/lub dymoszczelności. Badanie jednak przeprowadzane jest według innej normy badawczej [123], [124] – to drzwi stanowią element próbny, a ściana działowa jest ich stowarzyszona (w przypadku odporności ogniowej) lub uzupełniająca (w przypadku dymoszczelności) konstrukcją mocującą. Przypadki tego typu oraz metodyka badania elementów w zakresie odporności ogniowej przedstawione zostały w artykułach [10], [29], [32], [34], [43], [44], [46], [47], a w zakresie dymoszczelności – w artykułach [26], [29], [34], [40], [43], [44].

2.4.2. Konstrukcja mocująca

Element próbny instalowany jest w konstrukcji mocującej, która wbudowywana jest w specjalną ramę badawczą, zaprojektowaną tak, aby odtworzyć wymagane warunki brzegowe i warunki mocowania.

Przeszkłona ściana działowa montowana jest w konstrukcji mocującej o odporności ogniowej przynajmniej współmiernej ze spodziewaną odpornością ogniową próbki. Montaż elementu próbnego powinien być wykonany w sposób możliwie jak najbardziej reprezentatywny dla stosowanego w warunkach rzeczywistych. Połączenia między przeszkłoną ścianą działową a konstrukcją mocującą wraz z łącznikami i materiałem stosowanym do wykonania połączenia traktowane są jako część elementu próbnego i powinny być takie same, jak w warunkach rzeczywistych.

Badanie w zakresie odporności ogniowej może być przeprowadzone w standardowej lub niestandardowej konstrukcji mocującej.

Standardowa konstrukcja mocująca jest stosowana do zamocowania przeszkłonej ściany działowej, która ma możliwy do ilościowego określenia wpływ na przepływ ciepła między konstrukcją a elementem próbnym oraz znaną

odporność na odkształcenie termiczne. Wyróżnia się konstrukcję sztywną i podatną.

Sztywne konstrukcje mocujące dzielą się na konstrukcje o niskiej i wysokiej gęstości. Pierwsza z wymienionych powinna być wykonana z bloczków z betonu komórkowego o gęstości $650 (\pm 200) \text{ kg/m}^3$, połączonych zaprawą dobraną w taki sposób, aby zapewnić oczekiwaną klasę odporności ogniowej. Konstrukcje o dużej gęstości to ściany z bloczków, murowane lub jednorodne ściany betonowe o gęstości powyżej 850 kg/m^3 .

Konstrukcje standardowe podatne wykonywane są z płyt gipsowo-kartonowych typu F na ruszcie ze stalowych profili o grubości 0,5 mm do 1,5 mm, rozmieszczonych w rozstawie co 400 do 625 mm. Pomiedzy płytami, w obszarze profili, zależnie od oczekiwanej odporności ogniowej, umieszczona jest warstwa wełny mineralnej o odpowiedniej grubości i gęstości. Dla każdej klasy odporności ogniowej wyróżnione zostały trzy grupy podatnych konstrukcji mocujących, zależnych od głębokości zastosowanego profilu stalowego. Specyfikacja podatnych konstrukcji mocujących wraz z podziałem na grupy przedstawiona została w tabelicy 2. Zastosowanie w badaniu konstrukcji mocującej z danej grupy obejmuje całą grupę konstrukcji oraz konstrukcje z grupy wyższej (tej, w której profile mają większe głębokości).

Tabela 2. Specyfikacja podatnych konstrukcji mocujących [125]

Oczekiwana klasa odporności ogniowej	Nominalna głębokość słupa stalowego [mm]			Okładzina z płyt gipsowo-kartonowych typu F		Izolacja z wełny mineralnej	
	grupa A	grupa B	grupa C	liczba warstw na stronę	grubość płyty [mm]	grubość [mm]	gęstość [kg/m^3]
EI 30	44 do 55	56 do 75	76 do 100	1	12,5	40 do 50	30 do 60
EI 60	44 do 55	56 do 75	76 do 100	2	12,5	40 do 50	30 do 60
EI 90	44 do 55	56 do 75	76 do 100	2	12,5	40 do 50	85 do 115
EI 120	62 do 70	71 do 75	76 do 100	2	15	60 do 70	85 do 115

Niestandardowa konstrukcja mocująca jest specjalną konstrukcją, w której przeszklona ściana działowa ma być zamontowana w warunkach rzeczywistych i która jest stosowana do zamknięcia pieca; zapewnia ona odpowiednie zamocowanie i przepływ ciepła przyjęty w rzeczywistym użytkowaniu. Przykładowo niestandardową konstrukcją mocującą stanowić może przeszklona ściana działowa tego samego systemu, ale o wyższej klasie odporności ogniowej.

Standardowa konstrukcja mocująca podatna lub konstrukcja stowarzyszona powinna być zamontowana w sposób, który zapewnia im swobodę odkształcenia wzdłuż pionowych krawędzi w kierunku prostopadłym do płaszczyzny konstrukcji. Oznacza to, że na każdym końcu konstrukcji powinna być krawędź swobodna.

W przypadku gdy zastosowana jest standardowa konstrukcja mocująca sztywna, nie powinna mieć ona swobody odkształcenia wzdłuż pionowych krawędzi w kierunku prostopadłym do płaszczyzny konstrukcji. Oznacza to, że powinna być zamocowana do wnętrza ramy do badań, tak jak w warunkach rzeczywistych. Zazwyczaj konstrukcję mocującą należy przygotować przed zamocowaniem elementu próbnego, pozostawiając w niej otwór odpowiedniej wielkości.

2.4.3. Aparatura badawcza

2.4.3.1. Wykaz wyposażenia badawczego

Do wyposażenia badawczego niezbędnego do przeprowadzenia badania w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych zalicza się następujące elementy:

- piec do badań wraz z wyposażeniem kontrolnym, umożliwiającym sterowanie temperaturą oraz regulowanie i monitorowanie ciśnienia gorących gazów w piecu w sposób, który umożliwia poddanie elementów próbnych odpowiednim warunkom badania określonym w normach badawczych,
- ramę do badań, w której można zamontować konstrukcję do badań lub konstrukcję mocującą i którą można usytuować względem pieca w taki sposób, aby możliwe było wywołanie odpowiednich warunków nagrzewania i ciśnienia,
- odpowiednie wyposażenie umożliwiające pomiar temperatury wewnątrz pieca oraz na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego (w przypadku przeszklonych ścian działowych ocenianych pod względem izolacyjności ogniowej),
- wyposażenie niezbędne do oceny szczelności ogniowej,

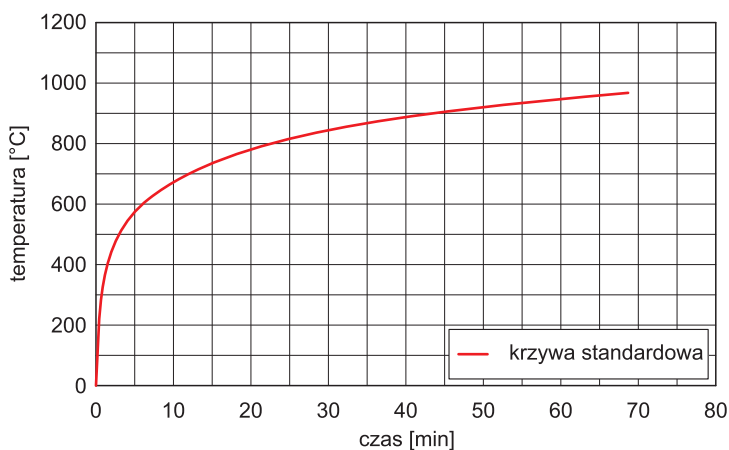
- sprzęt umożliwiający pomiar przemieszczeń elementu próbnego,
- wyposażenie umożliwiające dokładny pomiar czasu badania,
- wyposażenie do pomiaru stężenia tlenu w gazach piecowych.

2.4.3.2. Piece do badań

W uproszczony sposób można napisać, że celem badania w zakresie odporności ogniowej jest pomiar zdolności reprezentatywnego elementu próbnego przeszklonej ściany działowej do powstrzymania przedostawania się pożaru (ognia, gorących gazów oraz wysokiej temperatury) z jednej strony elementu na drugą. Dlatego też najistotniejszym elementem aparatury badawczej jest ten symulujący pożar.

Piec do badań odporności ogniowej ścian działowych może być zasilany paliwem płynnym lub gazowym. Wewnętrzna komora pieca do badań musi być w odpowiedni sposób zaizolowana. Dopuszcza się do tego materiały o gęstości poniżej 1000 kg/m^3 i grubości min. 50 mm, które powinny stanowić minimum 70% wewnętrznej powierzchni pieca. Najważniejsze jest jednak to, żeby komora badawcza umożliwiała zapewnienie standardowych warunków badania odporności ogniowej pod względem oddziaływania cieplnego i ciśnienia.

W przypadku przeszklonych ścian działowych piec do badań musi umożliwić nagrzewanie elementu próbnego z jednej strony według standardowej krzywej temperatura-czas (będącej odwzorowaniem w pełni rozwiniętego pożaru wewnątrz budynku – rys. 8) oraz utrzymywanie odpowiedniego poziomu ciśnienia przez całe badanie (w większości przypadków jest to 20 Pa wzdłuż górnej krawędzi elementu próbnego).

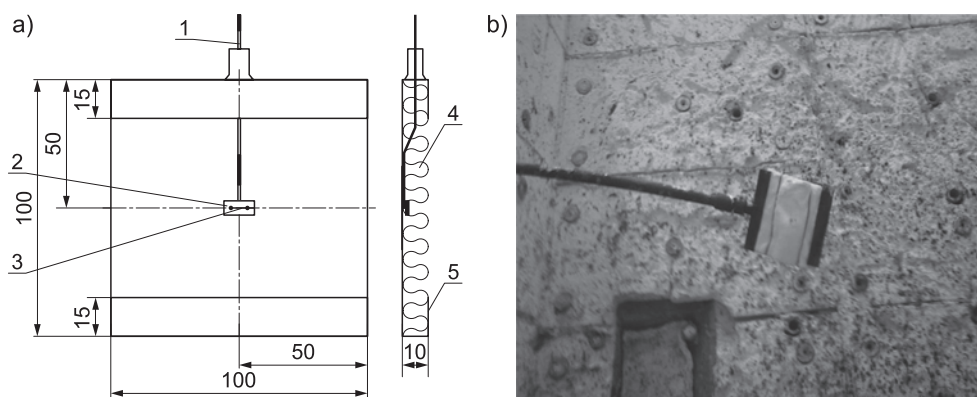


Rys. 8. Krzywa standardowa [79]

Przez wiele lat maksymalne wymiary elementów badawczych nie przekraczały 3×3 m, co oznaczało, że najpopularniejsze piece do badań odporności ogniowej elementów pionowych miały właśnie taki rozmiar. Wielkości te wynikały z wymiarów minimalnych elementów próbnych określonych w powszechnie stosowanych normach badawczych. Badanie takich elementów pozwalało na rozszerzanie wyników zastosowania na większe konstrukcje [67], [75], [76], jakie spotykano w realnych budynkach, jednak w wielu obiektach zdarzały się konstrukcje o wymiarach znacznie przekraczających te, które można było wykorzystać podczas badania. Z upływem czasu konstrukcje tego typu pojawiały się w obiektach coraz częściej, co wymusiło konieczność budowania większych pieców. W kilku europejskich laboratoriach badawczych powstały piece o większych wymiarach (wysokość \times szerokość), np. w IBS (Austria): 9×4 m; Pavus (Czechy): 6×6 m; CSTB (Francja): $12 \times 3,5$ m; Fires (Słowacja): 5×5 m; IBMB Braunschweig (Niemcy): 5×5 m; ITB (Polska): $4,5 \times 5$ m, 7×10 m [71].

2.4.3.3. Termoelementy wewnątrz pieca

W piecu do badań powinny być zainstalowane termoelementy umożliwiające pomiar temperatury oraz prowadzenie jego nagrzewania zgodnie z odpowiednią krzywą. Pomiar temperatury wykonuje się przy użyciu termoelementów płytkowych przedstawionych na rysunku 9.



Rys. 9. Termoelement płytkowy

a) schemat, b) termoelement zamontowany w piecu; 1 – termoelement płaszczyzny ze spoiną pomiarową galwanicznie odizolowaną od płaszcza, 2 – przyspawany punktowo lub przykręcony pasek stalowy, 3 – spoina pomiarowa termoelementu, 4 – materiał izolacyjny, 5 – pasek blachy ze stopu niklu o grubości $(0,7 \pm 0,1)$ mm [54], [87]

Termoelementy płytkowe stanowią zestaw mierników z odpowiednio wygiętej blachy stalowej, będącej obudową, wypełnioną materiałem izolacyjnym z przymocowanym wewnątrz termoelementem. Obudowa wykonana jest z paska blachy ze stopu niklowego o grubości $0,7 \pm 0,1$ mm i wymiarach $150 (\pm 1) \times 100 (\pm 1)$ mm, uformowanego zgodnie z rysunkiem 9a. Spoinę pomiarową stanowi drut: nikiel chrom / nikiel aluminium, czyli typ K, jak określono w normie EN 60584-1 [126], który wyposażony jest w mineralną izolację i umieszczony razem z nią w płaszczu wykonanym ze stopu stali żaroodpornej o nominalnej średnicy 1 do 3 mm. Spoina pomiarowa zamocowana jest w geometrycznym środku obudowy, przy użyciu małego paska blachy stalowej wykonanej z tego samego materiału co obudowa. Pasek ten może być zarówno przyspawany, jak i przykręcony do obudowy. Częściej stosowane jest drugie rozwiązanie, które pozwala na łatwą wymianę termoelementu. Obudowa (płytką) wraz z zamocowanym termoelementem wypełniona jest wkładką z nieorganicznego materiału izolacyjnego o gęstości 280 ± 30 kg/m³, grubości 10 ± 1 mm i nominalnych wymiarach przekroju $97 (\pm 1) \times 97 (\pm 1)$ mm.

Przed pierwszym użyciem termoelement płytkowy powinien zostać poddany starzeniu przez umieszczenie go na godzinę w piecu nagrzanym do 1000°C. Za równorzędne uznaje się nagrzewanie termoelementu przez 90 minut, przy oddziaływaniu standardowej krzywej temperatura-czas. Termoelementy tego typu mają termin przydatności i zgodnie z wymaganiami normy badawczej [125] powinny być wymieniane po 50 godzinach nagrzewania w piecu do badań.

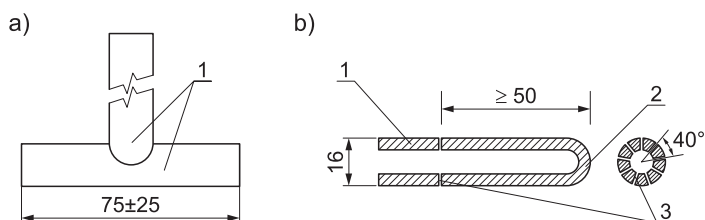
Termoelementy płytkowe nie są odporne na uszkodzenia. Spadające części elementu próbnego i konstrukcji mocującej mogą powodować ich zniszczenie, przez co przy ciągłym użytkowaniu ich jakość ulega pogorszeniu, z czasem stają się również mniej czułe. Dlatego też przed każdym badaniem powinny zostać sprawdzone, czy działają w prawidłowy sposób. Sprawdzenie wykonać można przy użyciu termopary wzorcowej i ręcznego palnika gazowego. Jeżeli temperatura wskazywana przez umieszczone obok siebie termopary (sprawdzaną oraz wywzorcowaną) nagrzewane palnikiem gazowym jest zbliżona, należy uznać, że dana termopara piecowa działa w sposób prawidłowy.

Przed badaniem w zakresie odporności ogniowej przeszklonej ściany działowej termoelementy piecowe powinny być równomiernie rozłożone w pionowej płaszczyźnie w odległości 5 do 15 cm od najbliższej płaszczyzny badanego zestawu (element próbny oraz konstrukcja mocująca). Na każde 1,5 m² nagrzewanej powierzchni elementu próbnego należy zastosować przynajmniej jeden termoelement płytkowy, przy czym ich liczba dla całej konstrukcji nie może być mniejsza niż 4 sztuki.

Uchwyt termoelementu nie powinien wnikać do wnętrza elementu próbnego ani być do niego zamocowany, chyba że nie jest możliwe zapewnienie w inny sposób prawidłowego położenia spoiny pomiarowej. W przypadku gdy będzie to konieczne, należy wykonać mocowanie w taki sposób, aby termoelement miał jak najmniejszy wpływ na zachowanie elementu próbnego.

2.4.3.4. Ciśnienie i atmosfera w piecu do badań

Ciśnienie wewnątrz pieca powinno być mierzone przy użyciu czujników typu T lub czujników rurkowych. Schemat instrumentów pomiarowych tego typu przedstawiono na rysunku 10. Powinny one umożliwiać pomiar z dokładnością do 2 Pa.



Rys. 10. Schemat czujek ciśnienia

a) czujnik typu T, b) czujnik rurkowy; 1 – rurka ze stali nierdzewnej o średnicy 5 mm do 10 mm, 2 – zaspawany koniec, 3 – otwór o średnicy 1,2 mm [53], [127]

Piece do badań powinny być wyposażone w sprzęt umożliwiający pomiar stężenia tlenu, ponieważ wymagane jest, aby stężenie tlenu w atmosferze pieca wynosiło nie mniej niż 4%. Wymaganie to można pominąć w przypadku elementów palnych (np. przeszklonych ścian drewnianych), jednakże nie zmienia to faktu, że atmosfera wewnątrz pieca powinna być monitorowana.

2.4.3.5. Ramy do badań

Ramy do badań stosowane są w celu odtworzenia warunków brzegowych i warunków mocowania odpowiednich dla konstrukcji badawczych. W zależności od typu konstrukcji badawczej wymagane są ramy o różnej sztywności. Zachowanie ramy do badań należy ocenić poprzez przyłożenie siły rozprężającej wewnątrz ramy, w połowie szerokości pomiędzy przeciwnymi bokami i zmierzenie zwiększenia wewnętrznego wymiaru, które nie powinno przekraczać 5 mm, przy przyłożonej sile o wartości 25 kN. Ocena powinna być przeprowadzona w obu kierunkach ramy. W praktyce najczęściej stosowane

są ramy wykonane ze spawanych profili stalowych lub żelbetowe, przy czym te drugie zdecydowanie szybciej się zużywają i tracą swoje właściwości. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe ramy do badań.

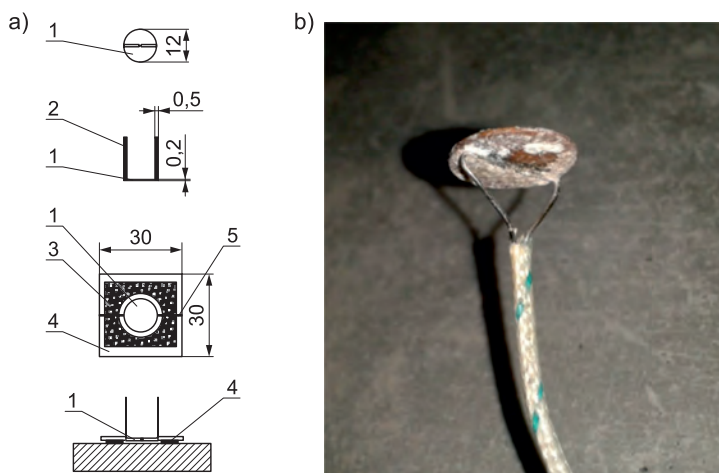


Rys. 11. Stalowe ramy do badań w zakresie odporności ogniowej [127]

2.4.3.6. Temperatura elementu próbnego oraz temperatura otoczenia

Jeżeli przeszklona ściana działowa poddana jest ocenie zgodności z kryterium izolacyjności ogniowej, to do jej nienagrzewanej powierzchni należy przymocować termoelementy powierzchniowe służące do pomiaru temperatury średniej i maksymalnej. Są one wykonywane zgodnie z rysunkiem 12, jako termoelementy krążkowe typu K. W celu zapewnienia dobrego kontaktu termicznego ich druty, mające średnicę 0,5 mm, zamocowane są do miedzianego krążka o średnicy 12 mm i grubości 0,2 mm. Druty są przylutowane do krążka, a przed przylutowaniem dopuszczalne jest skręcenie ich ze sobą. Krążek miedziany przykryty jest izolującą nakładką wykonaną z materiału na bazie włókien krzemianowych o gęstości $900 \pm 100 \text{ kg/m}^3$, klasie reakcji na ogień A1 lub A2 określonej zgodnie z normą EN 13501-1 [128] oraz wymiarach $(28 \text{ do } 32) \times (28 \text{ do } 32) \times (1,5 \text{ do } 2,5) \text{ mm}$ (szerokość \times wysokość \times grubość). Nakładki izolujące muszą być w odpowiedni sposób nacięte tak, aby możliwe

było umieszczenie drutu. W przypadku gdy druty termoelementu są przylutowane do krążka oddzielnie (nie są skręcone), nacięcia mogą się zaczynać w przeciwległych narożnikach nakładki lub w połowie przeciwległych krawędzi. Sprzęt rejestrujący oraz pomiarowy powinien być wykonany w taki sposób, aby zapewnić pomiar z dokładnością do 4 K.

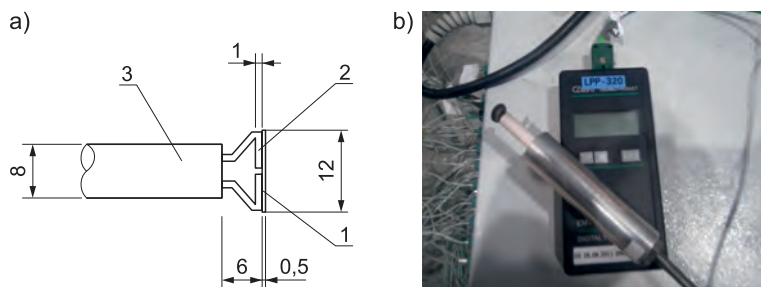


Rys. 12. Termoelement powierzchniowy

a) schemat budowy i zamocowania (wymiarzy w mm), b) wygląd termoelementu powierzchniowego; 1 – krążek miedziany, 2 – termoelement typu K, 3 – nakładka izolująca, 4 – przykład położenia kleju, 5 – nacięcia umożliwiające zamontowanie termoelementu [126]

W praktyce zdarzyć się może, że powierzchnia badanego elementu próbnego w pewnym obszarze nie będzie płaska, lecz zakrzywiona. W takich przypadkach dopuszczalne jest odpowiednie zakrzywienie krążka w celu dopasowania go do danej powierzchni. Dopuszczalne jest także zmniejszenie wymiarów nakładki, jeżeli z jakiegoś powodu jest to konieczne, przy czym nakładka zawsze musi zakrywać miedziany krążek. Termoelementy powierzchniowe mocowane są za pomocą ceramicznego kleju na bazie wody lub przypinane klamrami przez nakładkę (podczas mocowania do drewnianych profili ścian). W tym drugim przypadku musi to być wykonane w taki sposób, aby klamra nie przechodziła przez krążek ani druty termoelementu, bądź stykała się z nimi w jakikolwiek sposób.

Oprócz opisanych wyżej termoelementów powierzchniowych, do pomiaru temperatury nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego służy także tzw. termoelement ruchomy, umożliwiający pomiar w dowolnym punkcie w trakcie badania.



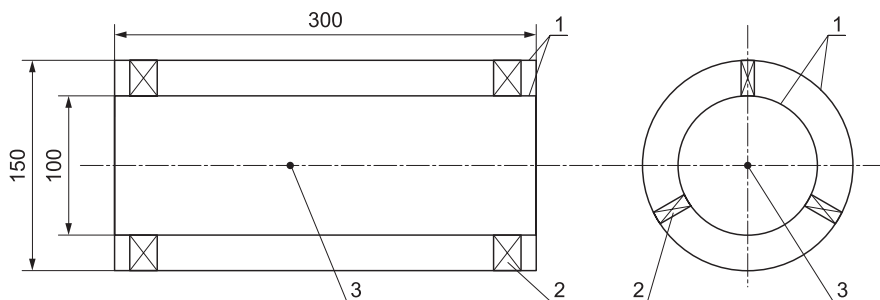
Rys. 13. Termoelement ruchomy

a) schemat budowy (wymiarzy w mm), b) wygląd termoelementu ruchomego;
 1 – krążek miedziany o grubości 0,5 mm, 2 – termoelement typu K o grubości 1,0 mm,
 3 – podwójnie nawiercony nośnik ceramiczny [25], [53]

Spoina pomiarowa termoelementu ruchomego składa się z drutu o średnicy 1 mm, opisanego wcześniej typu K, przylutowanego lub przyspawanego do miedzianego krążka o średnicy 12 mm i grubości 0,5 mm. Dokładny schemat termoelementu przedstawiono na rysunku 13. Termoelement tego typu powinien być wyposażony w odpowiedniej długości uchwyt umożliwiającą zastosowanie go do każdego punktu nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego.

Podczas badania odporności ogniowej niezbędne jest także monitorowanie warunków środowiskowych, w tym pomiaru temperatury otoczenia. Pomiar ten wykonywany jest przy użyciu termoelementu typu K o średnicy nominalnej 3 mm z płaszczem ze stali nierdzewnej oraz izolacją mineralną. Spoina pomiarowa powinna być osłonięta przed wpływem promieniowania od nagrzewanego elementu próbnego oraz przed przeciągami.

Schemat konstrukcyjny termoelementu do pomiaru temperatury otoczenia przedstawiono na rysunku 14, a jego wygląd na rysunku 15.



Rys. 14. Schemat termoelementu do pomiaru temperatury otoczenia
 1 – rury koncentryczne, 2 – dystans, 3 – umiejscowienie termoelementu do pomiaru
 temperatury otoczenia (wymiarzy w mm) [53]



Rys. 15. Termoelement do pomiaru temperatury otoczenia [24]

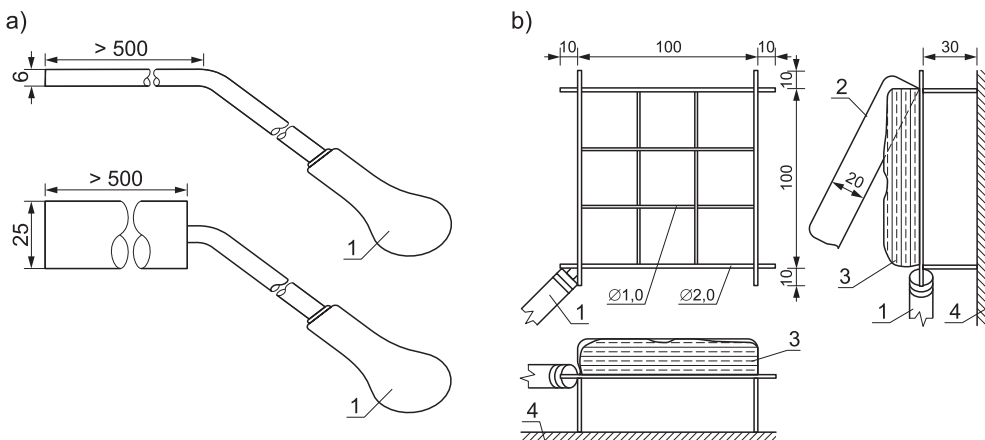
2.4.3.7. Pomiar szczelności ogniowej

Do pomiaru szczelności ogniowej elementów próbnych przeszklonych ścian działowych, oprócz wprawnego oka osoby prowadzącej badanie (niezbędnego do zarejestrowania pojawienia się płomienia ciągłego, tj. trwającego dłużej niż 10 s), zaliczyć należy tampon bawełniany oraz szczelinomierze. Podobnie, jak całe opisane wcześniej wyposażenie, tak i te elementy muszą być wykonane w ściśle określony sposób.

W przypadku szczelinomierzy występują dwa typy elementów. Powinny one być wykonane z okrągłych stalowych prętów o średnicach odpowiednio $6 \pm 0,1$ mm oraz $25 \pm 0,2$ mm. Szczelinomierze powinny mieć odpowiednią długość oraz być wyposażone w izolowany uchwyt, co umożliwi pomiar w dowolnym miejscu elementu próbnego. Schemat szczelinomierzy przedstawiono na rysunku 16a.

Tampon bawełniany stosowany do oceny szczelności ogniowej elementów przeszklonych powinien mieć formę prostopadłościanu o wysokości 20 mm i wymiarach podstawy 100×100 mm. Jego waga powinna zawierać się pomiędzy 3 a 4 g. Tampon należy wykonać w 100% z czystych, nieimpregnowanych i niebarwionych miękkich włókien bawełnianych. Przed zastosowaniem powinien być dokładnie wysuszony (przez conajmniej 30 min w temperaturze $95\text{--}105^\circ\text{C}$). Po wysuszeniu może być przechowywany przez tydzień w eksykatorze lub szczelnie zamkniętych pojemnikach. Tampon należy umieścić w drucianej ramce o wymiarach $100 \pm 5 \times 100 \pm 5 \times 20 \pm 1$ mm (rysunek 16b),

wyposażonej w izolowaną rączkę o odpowiedniej długości oraz pręty dystansowe o długości 30 mm, zapewniające usytuowanie go w odpowiedniej odległości od powierzchni elementu próbnego.



Rys. 16. Sprzęt do pomiaru szczelności ogniowej

a) szczelinomierz, b) ramka do mocowania tamponu bawełnianego; 1 – izolowany uchwyt, 2 – zatrzask (otwarty), 3 – tampon bawełniany 100 mm × 100 mm × 20 mm o masie $(3,5 \pm 0,5)$ g, 4 – powierzchnia elementu próbnego (wymiary w mm) [125]

2.4.3.8. Pomiar promieniowania

Promieniowanie w trakcie badania w zakresie odporności ogniowej mierzone jest przy użyciu miernika strumienia ciepłego. Tarcza instrumentu powinna być narażona na konwekcję i promieniowanie. Radiometr tego typu powinien pozwalać na dokonanie pomiaru do minimum 50 kW/m^2 z dokładnością $\pm 5\%$ maksymalnego zakresu. Aparatura do pomiaru promieniowania widoczna jest na rysunku 17.

2.4.3.9. Pomiar deformacji elementu próbnego

Pomiar deformacji w charakterystycznych miejscach przeszklonych ścian działowych ma charakter informacyjny. Przemieszczenia nienośnych elementów próbnych nie są czynnikiem wpływającym na zachowanie kryteriów skuteczności działania w zakresie odporności ogniowej, jednakże znajomość ich wartości może być przydatna przy ustalaniu zakresu zastosowania wyników badań. Pomiaru te mogą być wykonywane z użyciem sprzętu wykorzystującego techniki mechaniczne, optyczne lub elektryczne, umożliwiające weryfikację ugięć z dokładnością ± 2 mm.



Rys. 17. Pomiar promieniowania prowadzony podczas badania odporności ogniowej ściany z pustaków szklanych [80]

Możliwe jest zatem zastosowanie zarówno specjalistycznych czujników linkowych lub laserowych, czy też tych wykorzystujących metodę cyfrowej korelacji obrazu 3D [129], jak również zwykłej miarki z linką lub prętem stanowiącymi podstawę odniesienia. Podstawa odniesienia powinna zostać umieszczona w pewnym oddaleniu od nienagrzewanej powierzchni przeszklonej ściany działowej, aby zapewnić, że w przypadku przemieszczenia na zewnątrz pieca element próbny nie będzie się z nią stykał. Ponadto podstawa odniesienia powinna być wykonana w sposób, który zapewni, że nie będzie przemieszczać się w kierunku do pieca lub przeciwnym pod wpływem ciepła emitowanego przez element próbny.

Przed rozpoczęciem badania podstawa odniesienia mocowana jest w poprzek, od frontu elementu próbnego, na wysokości, na której będą dokonywane pomiary. Element próbny zostaje oznaczony w miejscach pomiaru oraz zmierzona zostaje odległość pomiędzy podstawą odniesienia a elementem próbnym, stanowiąca wartość zerową. Pomiary należy wykonywać z dużą ostrożnością, tak aby nie uszkodzić elementu próbnego.

Po rozpoczęciu badania należy wykonywać dalsze odczyty we właściwych odstępach czasu, umożliwiające odtworzenie ruchu elementu próbnego w czasie. Co prawda nie ma ustalonych reguł doboru odstępów czasu pomiędzy pomiarami, niemniej jednak w normie [125] przedstawiono pewne sugestie. W przypadku badania trwającego do 60 minut, pomiar należy prowadzić co 10 minut, przy czym dwa ostatnie pomiary przed zbliżającym się czasem klasyfikacyjnym powinny być przeprowadzone w odstępie 5 minut. W badaniu trwającym powyżej 60 minut, ale nie więcej niż 120 minut, pomiary wykonywane powinny być co 20 minut, a ostatnie dwa pomiary powinny zostać przeprowadzone w odstępie 5 minut w przypadku badania 90-minutowego oraz 10 minut w przypadku badania 120-minutowego.

W normie badawczej zaleca się przeprowadzenie pierwszego pomiaru deformacji w 10. minucie testu. Badania wykonane w ramach niniejszej monografii wskazują, że największe deformacje nastąpiły w ciągu pierwszych 5 minut badania (pomiar w miejscach, w których spodziewano się największych ugięć prowadzony był przy użyciu termoelementów linkowych lub laserowych w sposób ciągły, z zapisem danych w odstępach co 15 s), natomiast w 10. minucie badania wartość deformacji była zdecydowanie niższa.

Przemieszczenia elementu próbnego w przypadku przeszklonych ścian działowych należy mierzyć w geometrycznym środku ściany oraz w środku wysokości na każdym ze słupów. W przypadku bezszprosowych ścian działowych pomiar wykonuje się w odległości 20 mm od pionowego połączenia przeszkleń. Miejsca, w których należy prowadzić pomiar deformacji elementu próbnego przeszklonej ściany działowej przedstawiono na rysunku 18.

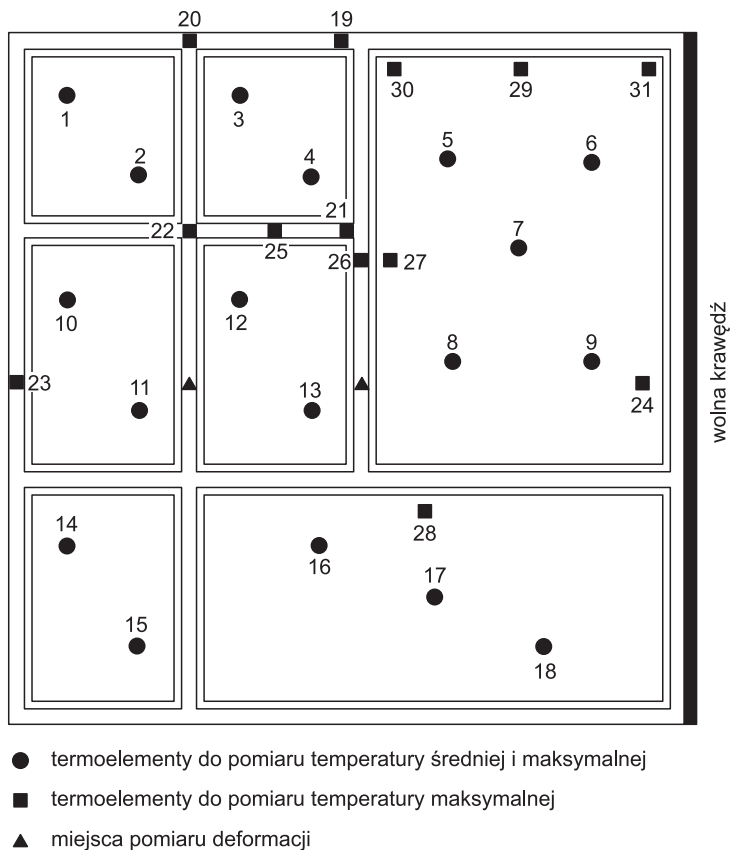
2.4.3.10. Przygotowanie urządzeń i sprzętu pomiarowego przed badaniem

Rama badawcza wraz z konstrukcją mocującą oraz elementem próbnym przeszklonej ściany działowej dostawiana jest do czołowego otworu komory pieca. Termoelementy piecowe ustawiane są w taki sposób, aby znajdowały się w odpowiedniej odległości od nagrzewanej powierzchni próbki.

Jeżeli ściana działowa poddana jest ocenie zgodności z kryterium izolacyjności ogniowej, to do jej nienagrzewanej powierzchni mocowane są termoelementy powierzchniowe służące do pomiaru temperatury średniej i maksymalnej. Przykładowy rozkład termoelementów przedstawiono na rysunku 18.

Do pomiaru przyrostu temperatury średniej należy umieścić jeden termoelement powierzchniowy na każde $1,5 \text{ m}^2$ powierzchni przeszkleń, przy czym na każdej szybie powinny się znajdować minimum dwa równomiernie rozmieszczone termoelementy. Zależnie od liczby niezbędnych do zastosowania termoelementów rozmieścić je należy w następujący sposób:

- dwa termoelementy: po jednym na przeciwległych ćwiartkach szyby (termoelementy nr 1 – 4 oraz 10–15, numeracja zgodnie z rys. 18),
- trzy termoelementy: dwa na przeciwległych ćwiartkach i jeden na środku szyby (termoelementy nr 16–18),
- pięć termoelementów: jeden na środku szyby i po jednym na daną ćwiartkę przeszklenia (termoelementy nr 5–9).



Rys. 18. Przykładowy rozkład termoelementów na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego przeszkłonej ściany działowej

Oprócz wymienionych wyżej, w celu weryfikacji temperatury maksymalnej należy dodatkowo zamontować termoelementy w następujących miejscach:

- u góry elementu próbnego w połowie szerokości (termoelement nr 19),
- u góry elementu próbnego w linii słupa (termoelement nr 20),

- na każdym rodzaju połączenia słupa z rygłem (termoelementy nr 21 i 22),
- w połowie wysokości krawędzi zamocowanej (termoelement nr 23),
- w połowie wysokości krawędzi swobodnej, 150 mm od krawędzi (termoelement nr 24),
- w połowie szerokości rygla, w strefie dodatniego ciśnienia (termoelement nr 25),
- w połowie wysokości słupa, w strefie dodatniego ciśnienia (termoelement nr 26),
- w środku wysokości przeszklenia o największej powierzchni, 20 mm od pionowego elementu obramowania (termoelement nr 27); w przypadku gdy szyba o największej powierzchni nie jest najwyższą szybą, wtedy dodatkowy termoelement należy umieścić w środku wysokości najwyższej szyby, 20 mm od pionowego elementu obramowania,
- w środku szerokości przeszklenia o największej powierzchni, 20 mm od poziomego elementu obramowania, na górnej krawędzi szyby (termoelement nr 29); w przypadku gdy szyba o największej powierzchni nie jest najszerszą szybą, wtedy dodatkowy termoelement należy umieścić w środku rozpiętości najszerzej szyby, 20 mm od pionowego elementu obramowania, na górnej krawędzi szyby (termoelement nr 28),
- w górnych narożach przeszklenia o największej powierzchni, 20 mm od poziomego elementu obramowania (termoelementy nr 30 i 31) oraz dodatkowo na najwyższym położonym przeszkleniu o największej powierzchni, 20 mm od poziomego elementu obramowania.

W przypadku gdy podczas badania sprawdzane ma być również kryterium promieniowania, należy przed geometrycznym środkiem elementu próbnego, w odległości 1 m od jego powierzchni nienagrzewanej, ustawić radiometr.

Przed rozpoczęciem badania należy również przygotować urządzenia do pomiaru przemieszczeń oraz sprzęt do sprawdzenia kryterium szczelności ogniowej.

2.4.4. Kryteria skuteczności działania

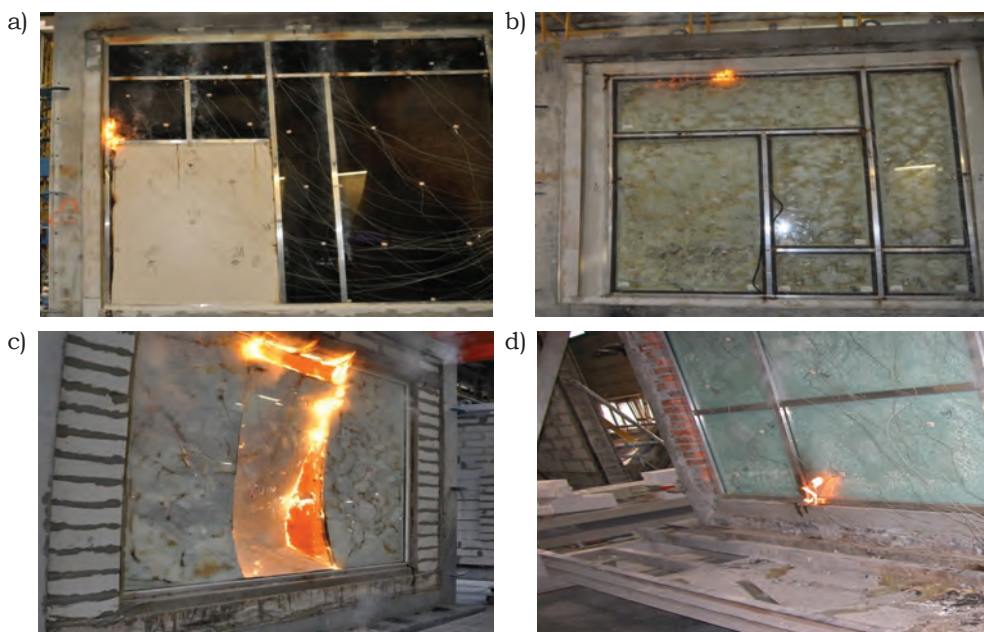
2.4.4.1. Kryteria skuteczności działania mające zastosowanie w przypadku przeszklonych ścian działowych

W trakcie badania w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych sprawdzeniu podlegać mogą takie kryteria skuteczności działania, jak szczelność ogniowa, izolacyjność ogniowa, promieniowanie oraz odporność na oddziaływanie mechaniczne. Należy jednak zaznaczyć, że ostatnie z wymienionych kryteriów z uwagi na specyfikę jego weryfikacji (uderzenie

w element próbny ciałem o masie 200 kg) w przypadku przeszklonych ścian działowych jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia.

2.4.4.2. Kryterium szczelności ogniowej

Szczelność ogniowa to zdolność elementu konstrukcji, który pełni funkcję oddzielającą, do wytrzymania oddziaływania ognia tylko z jednej strony, bez przeniesienia ognia na stronę nienagrzewaną w wyniku przeniknięcia płomieni lub gorących gazów. Podczas badania szczelność ogniowa sprawdzana jest za pomocą szczelinomierzy, tamponu bawełnianego lub wizualnie i uznaje się, że została utracona, gdy: na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego pojawi się ogień ciągły trwający dłużej niż 10 s, tampon bawełniany ulegnie zapaleniu w czasie 30 sekund od momentu przyłożenia go do elementu próbnego, w wyniku działania ognia powstanie szczelina przekraczająca dopuszczalne wymiary. Na rysunku 19 przedstawiono elementy próbne przeszklonych ścian działowych, które utraciły szczelność ogniową.



Rys. 19. Moment utraty szczelności ogniowej przez przeszklone ściany działowe
a) ściana słupowo-ryglowa z profili aluminiowych z drewnianymi wkładami izolacyjnymi, b) ściana słupowo-ryglowa z profili aluminiowych z wkładami izolacyjnymi z płyt g-k, c) ściana bezszprosowa, d) ściana słupowo-ryglowa z profili stalowych wypełnionych zaprawą mineralną [87], [127]

W przypadku zastosowania szczelinomierzy wielkość otworu w powierzchni elementu próbnego należy oceniać w odstępach czasu określonych przez widoczne tempo degradacji elementu próbnego, przy czym nie należy używać nadmiernej siły, ponieważ może to spowodować uszkodzenie elementu próbnego. Po kolei należy użyć dwóch szczelinomierzy; w celu określenia, czy szczelinomierz 6 mm może przejść przez element próbny tak, że wchodzi w przestrzeń pieca i czy można go przesunąć na odcinku 150 mm wzdłuż szczeliny, lub czy szczelinomierz 25 mm może przejść przez element próbny punktowo, tak że wchodzi w przestrzeń pieca.

Tampon bawełniany przykładany jest aż do momentu zapalenia (przy czym nie dłużej niż przez 30 s), a kiedy już to nastąpi jest usuwany. Badanie jednak należy kontynuować do momentu, aż przekroczone zostaną pozostałe kryteria szczelności ogniowej, ponieważ okazać się może, że zapalenie tamponu było wynikiem utraty izolacyjności ogniowej przez element próbny, a w takim przypadku kryterium to nie jest brane pod uwagę przy ustalaniu szczelności ogniowej. Zapalenie tamponu bawełnianego definiowane jest jako żarzenie lub palenie się płomieniem, a oznakę zbliżającej się utraty szczelności ogniowej stanowić może zwęglenie się tamponu, jednakże w celu potwierdzenia przekroczenia kryterium zastosować należy nowy tampon. Zwęglenie tamponu bez pojawienia się płomienia czy też żarzenia nie jest brane pod uwagę przy ocenie szczelności ogniowej. Należy również zaznaczyć, że nie jest dozwolone potrząsanie tamponem czy też dmuchanie na niego po odjęciu od elementu próbnego, ponieważ mogłoby to spowodować jego zapłon. Podczas pomiarów tamponem bawełnianym należy zachować odstęp przynajmniej 10 mm pomiędzy obwodem tamponu i jakąkolwiek częścią elementu próbnego oraz przynajmniej 30 mm pomiędzy powierzchnią tamponu, a powierzchnią elementu próbnego. Odpowiednio wykonany „koszyk” do tamponu bawełnianego powinien zapewnić zachowanie tych odległości.

2.4.4.3. Kryterium izolacyjności ogniowej

Izolacyjnością ogniową nazywamy zdolność danego elementu, będącego oddzielającym elementem konstrukcji budowlanej, poddanego działaniu ognia z jednej strony, do ograniczenia przyrostu temperatury na powierzchni nienagrzewanej powyżej danego poziomu. Izolacyjność ogniowa weryfikowana jest za pomocą termoelementów powierzchniowych mocowanych do badanego elementu klejem odpornym na temperaturę. Termoelementy rozmieszczone są w konkretnych miejscach, opisanych w rozdziale 2.4.3.10. Dodatkowo pomiar może być prowadzony przy użyciu termoelementu ruchomego w każdym miejscu, w którym wystąpi podejrzenie o przekroczeniu kryterium izolacyjności ogniowej.

W przypadku przeszklonych ścian działowych maksymalny przyrost temperatury w danym punkcie ograniczony jest do 180 K, a średni przyrost temperatury do 140 K. Pomiar średniej temperatury prowadzony jest na przeszkleniach oraz panelach nieprzeziernych, jeżeli występują, natomiast pomiar temperatury maksymalnej prowadzony jest na profilach, jak również w odległości 150 mm od krawędzi swobodnej oraz w określonych miejscach przeszkleń (lub paneli) o największych wymiarach.

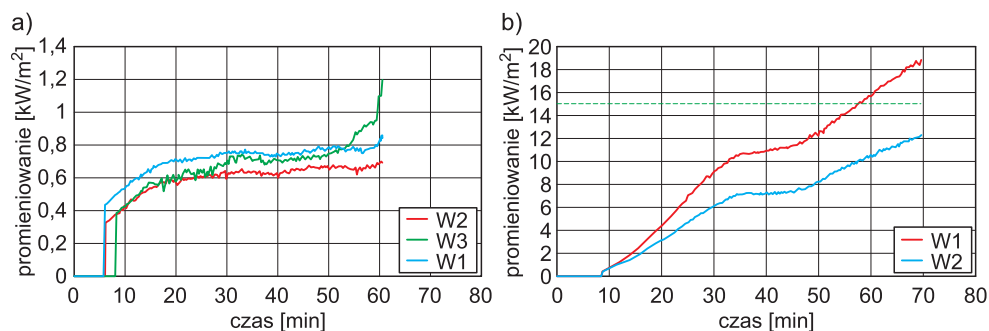
Celem pomiaru temperatury maksymalnej jest określenie poziomu izolacyjności danej przeszklonej konstrukcji w tych miejscach, gdzie spodziewane jest wystąpienie wyższej temperatury, przy czym gorące miejsca o małej powierzchni, takie jak wkręty, gwoździe czy klamry, należy pominąć. W tym celu termoelementy powinny być przymocowane zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziale 2.4.3.10. W przypadku umieszczenia termoelementu w pobliżu nieciągłości (np. pomiędzy przyległymi przeszklzeniami w ścianie bezszprosowej [78], [90]), środek miedzianego krążka termopary nie powinien znajdować się bliżej niż 20 mm od tej nieciągłości.

W przypadku pomiaru temperatury średniej celem jest ustalenie ogólnego poziomu izolacyjności ogniowej danego elementu próbnego, przy pominięciu poszczególnych gorących miejsc. Zazwyczaj średni przyrost temperatury na powierzchni nienagrzewanej opiera się na pomiarach uzyskanych z termoelementów powierzchniowych umieszczonych na środku lub w pobliżu środka elementu próbnego lub jego wydzielonego fragmentu (np. przeszklenia lub panelu nieprzeziernego), a także na środku lub blisko środka każdej ćwiartki tego fragmentu. W przypadku elementów o nieregularnej grubości (np. konstrukcje żebrowane lub faliste), liczbę i umiejscowienie termoelementów można zwiększać w celu uzyskania wartości średniej temperatury w miejscach o maksymalnej i minimalnej grubości. Pamiętać należy o tym, że termoelementy do pomiaru temperatury średniej powinny znajdować się w odległości co najmniej 50 mm od przewidywanych gorących miejsc. Przykładami takich miejsc mogą być złącza, połączenia, łączniki przelotowe, sworznie, wkręty, a także obszary, gdzie termoelementy mogą być wystawione na bezpośrednie uderzenie gorących gazów z pieca, przechodzących przez element próbny.

2.4.4.4. Kryterium promieniowania

Promieniowanie to zdolność danej przegrody przeszklonej do wytrzymania oddziaływania ognia tylko z jednej strony w taki sposób, aby ograniczyć prawdopodobieństwo przeniesienia go w wyniku znaczącego wypromieniowania ciepła albo poprzez element, albo z jego powierzchni nienagrzewanej do sąsiadujących materiałów.

Promieniowanie oceniane jest na podstawie czasu, w którym maksymalna wartość promieniowania, mierzonego zgodnie z EN 1363-2 [130], nie przekracza 15 kW/m^2 . Zgodnie z klasyfikacją zawartą w normie [108] przyjmuje się, że element, który spełnia kryteria izolacyjności ogniowej (przeszklona ściana działowa klasy EI), spełnia również kryterium promieniowania przez ten sam okres. Na rysunku 20a pokazano wykresy promieniowania zmierzonego w różnych punktach ściany działowej przeszklonej szybami przewidzianymi do stosowania w elementach o klasie izolacyjności ogniowej. Jak widać promieniowanie w takiej sytuacji jest niewielkie, co potwierdza słuszność założeń przedstawionych w normie klasyfikacyjnej [108]. Na rysunku 20b przedstawiono wykresy promieniowania w przypadku elementów, które nie są przewidziane do pełnienia funkcji izolującej podczas wystąpienia pożaru. Promieniowanie przez elementy tego typu jest zdecydowanie wyższe niż w przypadku przegród wyposażonych w przeszklenia ze specjalnym żelom.



Rys. 20. Wykres promieniowania dla elementu próbnego

a) przeszklonej ściany działowej z szybami ze specjalnym żelom ogniochronnym,
 b) przeszklonej ściany osłonowej z szybami nieizolacyjnymi (bez specjalnego żelom);
 W1, W2, W3 – pomiary promieniowania w odległości 1 m od charakterystycznych punktów pomiarowych usytuowanych na elemencie próbnym [71], [127]

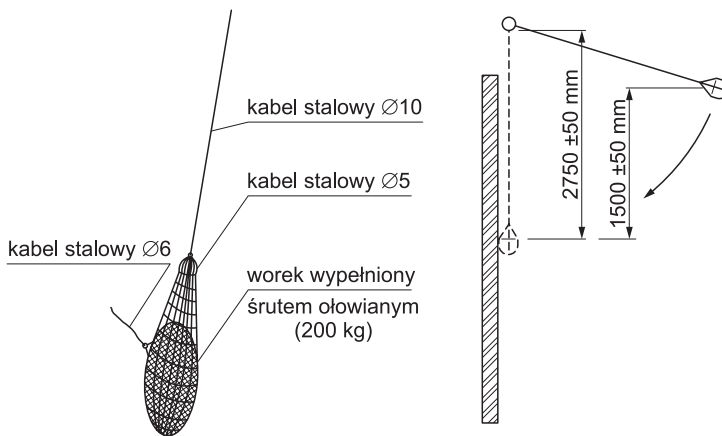
Kryterium promieniowania nie występuje w wymaganiach polskiego prawa budowlanego, jednakże problemy z nim związane oraz jego wpływ na organizm ludzki są szeroko omówione w polskiej i zagranicznej literaturze, np. [131]–[134].

2.4.4.5. Kryterium odporności na oddziaływanie mechaniczne

Odporność na oddziaływanie mechaniczne sprawdzana jest przez uderzenie w przeszkloną ścianę działową tzw. elementem uderzającym (eliptycznym workiem wypełnionym śrutem ołowianym). Element uderzający podwieszony

jest do stalowego kabla przymocowanego do stałego punktu na stanowisku badawczym i tak zamocowany, aby w stanie spoczynku dotykał tylko elementu próbnego w przewidywanym miejscu uderzenia.

Kryterium sprawdzane jest po osiągnięciu danego czasu klasyfikacyjnego. Jeżeli po trzykrotnym uderzeniu workiem opisanym wyżej przeszklona ściana działowa nie utraci szczelności oraz izolacyjności ogniowej, możliwe będzie sklasyfikowanie jej jako EI-M. Element uderzający oraz schemat sposobu uderzenia przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21. Element uderzający wraz ze schematem sposobu uderzenia [83]

2.4.5. Zakończenie badania

Badanie zostaje zakończone w chwili, gdy osiągnięte zostały wybrane kryteria odporności ogniowej. Przerwanie badania nastąpić może również wtedy, gdy dalsze jego prowadzenie stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa personelu lub może spowodować uszkodzenie wyposażenia badawczego.

Liczba niezbędnych do wykonania badań ogniowych w celu sklasyfikowania danej przeszklonej ściany działowej zależna jest od oczekiwanego zakresu zastosowania oraz od konstrukcji przegrody. W przypadku przegrody o symetrycznym przekroju wystarczające jest wykonanie jednego badania, natomiast w przypadku przegród niesymetrycznych – niezbędne jest sprawdzenie odporności ogniowej elementu z obu stron przekroju.

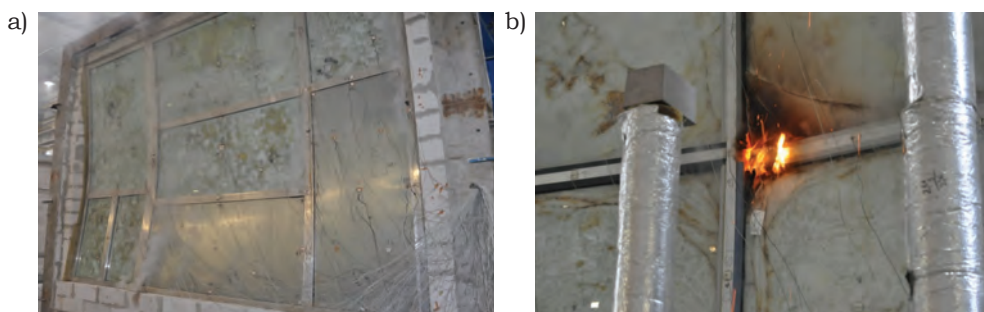
2.5. Zachowanie się przeszklonych ścian działowych w badaniach odporności ogniowej

Zachowanie elementów próbnych przeszklonych ścian działowych podczas badania ogniowego zależne jest przede wszystkim od materiałów składowych oraz wymiarów konstrukcji.

Szyby ogniochronne stosowane jako przeszklenia w pionowych przegrodach w zależności od oczekiwanej klasy odporności ogniowej mogą być wykonane jako monolityczne lub warstwowe. Szyby monolityczne stosowane są zazwyczaj w elementach nieposiadających klasy izolacyjności ogniowej, stanowią one tylko barierę dla ognia i gorących gazów. W trakcie badania nie dzieje się z nimi nic specjalnego, aż do momentu, kiedy osiągną temperaturę, w której zaczną się roztopiać i deformować. Zdecydowanie inaczej zachowują się przeszklenia warstwowe, wykonane z dwóch lub kilku hartowanych tafli szklanych przedzielonych specjalnym żelem lub folią. Wypełnienie pomiędzy szklanymi taflami pod wpływem działania wysokiej temperatury zwiększa swoją objętość, a szyby tracą przezroczystość i zmieniają kolor na biały, żółty lub zielonkawy w zależności od rodzaju zastosowanego szkła i żelu. Pod wpływem pęcznienia żelu oraz oddziaływania wysokiej temperatury warstwa przeszklenia znajdująca się najbliżej ognia w początkowej fazie badania najczęściej pęka i wpada do wnętrza pieca. W przypadku szyb wielowarstwowych zjawisko powtarza się kilkukrotnie, aż do momentu aktywacji ostatniej warstwy żelu. Szyby tego typu mogą być stosowane w przegrodach, którym stawiane są wymagania dotyczące szczelności i izolacyjności ogniowej, ponieważ warstwa spęczniałego materiału, oprócz powstrzymania ognia i gorących gazów, ogranicza przepływ ciepła przez powierzchnię przeszklenia. Zachowanie w warunkach pożaru szyby monolitycznej oraz warstwowej przedstawiono na rysunku 3.

Ściany wykonane z profili metalowych wykazują znaczne ugięcie, szczególnie w początkowej fazie badania, co widać na rysunku 22a. Metal rozszerza się pod wpływem wysokiej temperatury, w wyniku czego profile aluminiowe i stalowe stanowiące konstrukcję wyginają się w kierunku do wnętrza pieca. Poziom deformacji zależny jest od wysokości całej przegrody oraz rodzaju zastosowanego profilu i sposobu jego zaizolowania. Zjawisko to jest dość częstym powodem utraty szczelności ogniowej przez konstrukcje, ponieważ pod wpływem deformacji profile ryglowe mogą wypinać się z połączeń ze słupami, tworząc szczeliny, przez które ogień przedostaje się na nienagrzewaną powierzchnię ściany (rys. 22b). Ponadto nadmierne ugięcie spowodować może wysunięcie się przeszkleń z trzymających je uchwytów, co w konsekwencji doprowadzi do utraty szczelności ogniowej. Z tych względów sztywność profilu oraz jego

deformacja w wyniku oddziaływania pożaru standardowego wytypowane zostały jako parametry wyjściowe do oceny odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych o większej wysokości, co zostanie szerzej opisane w rozdziale 6. W przypadku ścian drewnianych widocznym od razu efektem oddziaływania wysokiej temperatury jest duża ilość dymu powstająca w wyniku zwęglania się profili. Dodatkowo zaobserwować można zdecydowanie niższe przyrosty temperatury na profilach, ponieważ drewno bardzo słabo przewodzi ciepło, a w warunkach oddziaływania ognia zwęglą się, tworząc warstwę izolacyjną. Drewno pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury kurczy się, co również powoduje deformację próbki, jednakże wartości tych przemieszczeń są niewielkie w porównaniu do tych występujących w konstrukcjach metalowych.



Rys. 22. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego przeszklonej ściany działowej w trakcie badania w zakresie odporności ogniowej
a) duża deformacja elementu próbnego, b) utrata szczelności ogniowej spowodowana nadmierną deformacją – uszkodzone połączenie słupa z ryglem [88]

2.6. Klasyfikacja ogniowa

Klasa odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych przyznawana jest zgodnie z normą EN 13501-2 [108] na podstawie badania w zakresie odporności ogniowej wykonanego według normy EN 1364-1 [109]. Norma klasyfikacyjna w przypadku ścian działowych definiuje kilka rodzajów możliwych do nadania klas odporności ogniowej związanych z kombinacjami parametrów skuteczności działania, takich jak szczelność ogniowa (E), izolacyjność ogniowa (I), promieniowanie (W) oraz odporność na oddziaływanie mechaniczne (M). Klasy zdefiniowane w normie [108] zestawione zostały w tablicy 3.

Tablica 3. Klasy odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych

E	–	20	30	–	60	90	120	–	–
EI	15	20	30	45	60	90	120	180	240
EI-M	–	–	30	–	60	90	120	180	240
EW	–	20	30	–	60	90	120	–	–

Wyniki badań zaokrąglane są zawsze w dół do najbliższej klasy, którą nadać można danej przeszklonej ścianie działowej. Jeżeli cechy stanowią kombinację, czas deklarowany jest czasem najkrótszym, ustalonym dla którejkolwiek z cech. Przykładowo, element próbny ściany działowej, który utracił swoją izolacyjność ogniową w 34. minucie badania wskutek przekroczenia temperatury maksymalnej w narożu przeszklenia, a szczelność ogniową w 62. minucie z uwagi na zapalenie się tamponu bawełnianego na połączeniu rygla ze słupem, sklasyfikowany powinien być jako EI 30 / E 60 (klasyfikacje, które stanowią kombinację klas i czasów podawane są zawsze w kolejności zwiększającego się czasu i zmniejszającej się liczby parametrów skuteczności działania). Warto tutaj zaznaczyć, że element ten sklasyfikować będzie można również jako EW 30, ponieważ – o czym wspomniano wcześniej – zgodnie z normą klasyfikacyjną [108] uznaje się, że elementy, które spełniają kryterium EI w danym czasie spełniają również kryterium EW.

Jeżeli w celu wyznaczenia klasy odporności ogniowej danej ściany działowej przeprowadzono więcej niż jedno badanie ze względu na oczekiwany zakres zastosowania (np. różne rodzaje przeszkleń lub niesymetryczne profile ściany), klasyfikację dla całego zakresu określa wynik najniższy z poszczególnych badań. Klasyfikacja jest ściśle powiązana z zakresem zastosowania, dlatego też wyniki pojedynczych badań prowadzą z reguły do wyższego zaszeregowania dla bardziej ograniczonego zakresu zastosowania.

W dokumencie klasyfikacyjnym danej przeszklonej ściany działowej, oprócz dokładnego opisu technicznego oraz przedstawienia klasy odporności ogniowej, znajduje się punkt odnoszący się do zakresu zastosowania wyników badania, określający wszystkie możliwe do wykonania zmiany w konstrukcji przeszklonej ściany działowej niewpływające na obniżenie jej właściwości ogniowych. Wyróżnić możemy zakres bezpośredniego zastosowania wyników badania, który przedstawiony jest w normie badawczej [109] oraz rozszerzony zakres zastosowania, opisany w normie [135].

Wyniki badań w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych mają bezpośrednie zastosowanie do podobnych konstrukcji, w których wprowadzona została jedna lub więcej z opisanych poniżej zmian.

Dopuszcza się zmianę kąta instalacji ściany do $\pm 10^\circ$. Możliwe jest także zwiększenie wymiarów konstrukcji. W przypadku szerokości norma [109] pozwala na nieograniczone jej powiększenie, pod warunkiem że w szerszej konstrukcji zastosowane będą takie same profile oraz zbadany zostanie element próbny o szerokości min. 2,8 m, zawierający wszystkie niezbędne połączenia do wykonania szerszej konstrukcji. Dotyczy to również połączeń dylatacyjnych, które mogą być niezbędne w ścianach o znacznej szerokości oraz połączeń kątowych. W przypadku połączeń kątowych należałoby przeprowadzić badanie specjalnego elementu próbnego, wielopłaszczyznowego, zbliżonego swoją konstrukcją do zdefiniowanego w normie badawczej, dotyczącej ścian osłonowych [136], oraz opisanego w artykułach [60], [137].

Jeżeli ściana działowa sprawdzana była również pod względem kryterium promieniowania, do poszerzenia jej szerokości dodatkowo wymagane jest, aby w czasie badania średni przyrost temperatury na przeszkleniach lub panelach nie przekroczył 300°C , a zmierzone podczas badania promieniowanie nie przekraczało $12,3 \text{ kW/m}^2$.

Oprócz szerokości dopuszczalne jest także zwiększenie wysokości ściany o 10% względem badanej wysokości, ale nie więcej niż o 0,3 m, pod warunkiem że ugięcie elementu próbnego w żadnym miejscu nie przekroczyło 0,1 m oraz, że w zwiększonym elemencie luzy ze względu na rozszerzalność zostaną powiększone w takim samym stosunku, co wysokość ściany. Dla elementów spełniających również kryterium promieniowania spełnione być muszą takie same warunki, jak w przypadku powiększenia szerokości.

Na podstawie wyników badań można klasyfikować konstrukcje o mniejszych wymiarach. Dopuszczalne jest zmniejszenie odległości pomiędzy słupami oraz ryglami, jak również wynikające z tego zmniejszenie wymiarów przeszkleń.

W przypadku poszczególnych materiałów konstrukcji również dopuszczane są zmiany. Dozwolone jest stosowanie przeszkleń o mniejszych wymiarach oraz zmiana ich współczynnika kształtu, przy czym maksymalna szerokość i wysokość przeszkleń nie może przekraczać tych zbadanych, a maksymalna powierzchnia szyby nie może być większa niż połowa sumy powierzchni największego przeszkleń zbadanego w układzie poziomym oraz największego przeszkleń sprawdzonego w układzie pionowym. Szyba o zmienionym kształcie musi być zamocowana w taki sam sposób, jak w przeprowadzonym badaniu oraz być umieszczona w takim samym systemie ramowym, co w celu wykorzystania opisanej możliwości implikuje konieczność przeprowadzenia badań profili łukowych lub też profili łączących się pod różnymi kątami. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że norma badawcza nie dopuszcza w żaden sposób stosowania w danym systemie szyb innych niż te, które zostały zbadane.

Rodzaj zastosowanego przeszklenia ma ogromny wpływ na zachowanie całej konstrukcji w przypadku wystąpienia pożaru, zarówno na właściwości związane ze szczelnością ogniową, jak również izolacyjnością i promieniowaniem. Każdy dodatkowy rodzaj szyby wprowadzany do danego systemu wymaga przebadania, ponieważ norma zabrania używania w jednym elemencie próbnym różnych rodzajów przeszkleń.

Profile stanowiące szkielet konstrukcji mogą być powiększane, a dokładniej pozwala się na zwiększenie wymiaru ich przekroju poprzecznego, przy czym nie jest to dopuszczalne dla profili, na których z uwagi na ich małe wymiary nie był prowadzony pomiar temperatury (ogólna norma dotycząca badań odporności ogniowej [125] zabrania umieszczania termoelementów w odległości mniejszej niż 20 mm od nieciągłości), a przeszklona ściana działowa sklasyfikowana była jako EI. Dopuszczalne są również różne zmiany dotyczące listew przyszybowych, z których najważniejszą jest możliwość zastosowania listew przykręcanych, jeżeli zbadane były zatrzaskowe.

Zastosowanie danej konstrukcji mocującej w badaniu ma także wpływ na możliwy zakres wykorzystania wyników badań. Jeśli element zamontowany był tylko w ramie badawczej, w praktyce możliwe będzie mocowanie go tylko w konstrukcjach sztywnych o dużej gęstości i klasie odporności ogniowej przynajmniej takiej, jak klasa badanego elementu.

W przypadku zastosowania standardowej podatnej konstrukcji mocującej dopuszczalne jest przeniesienie wyników badań na sztywne konstrukcje mocujące o wysokiej gęstości, przy czym muszą one mieć taką samą klasę odporności ogniowej, jak element, a ich grubość nie może być mniejsza niż grubość konstrukcji, w której zbadany był element próbny. Ponadto wyniki badań standardowej podatnej konstrukcji mocującej przenieść można na inne alternatywne podatne konstrukcje wykonane ze słupów z okładziną z płyt, przy czym konstrukcja ta nie może mieć mniejszej grubości niż zbadana konstrukcja mocująca, zaś liczba zastosowanych płyt oraz ogólna grubość okładziny nie mogą być mniejsze niż te zbadane. W przypadku konstrukcji o słupach drewnianych wymagane jest dodatkowo, aby miały one odpowiednią liczbę okładzin, zarówno na swojej powierzchni, jak i na styku konstrukcji mocującej z elementem.

Badanie w standardowej podatnej konstrukcji mocującej nie ma natomiast zastosowania do ścian z płyt warstwowych oraz wszelkich konstrukcji słupowych, w których okładzina nie pokrywa obustronnie słupów.

Jeżeli w badaniu zastosowana była sztywna konstrukcja mocująca o małej gęstości, to wyniki badań przenieść można na konstrukcje o wysokiej gęstości, przy czym musi ona posiadać minimum taką samą klasę odporności

ogniowej, jak element próbny oraz grubość nie mniejszą niż zbadana konstrukcja mocująca.

W przypadku zastosowania konstrukcji niestandardowych, w praktyce możliwe będzie mocowanie przeszklonych ścian działowych tylko w tych konkretnych konstrukcjach.

Dodatkowo w zakresie zastosowania przedstawionym w normie badawczej dopuszczone zostały zmiany, które wykorzystane być mogą w przypadku wystąpienia przekroczenia czasu klasyfikacyjnego w badaniu. Zmiany te dotyczą w głównej mierze zwiększania wymiarów konstrukcji oraz przeszkleń. Wymagane przekroczenie czasu klasyfikacyjnego przedstawione zostało w tablicy 4.

Tablica 4. Wymagane przekroczenie czasu klasyfikacyjnego [109]

Czas klasyfikacyjny [min]	Wymagane przekroczenie czasu klasyfikacyjnego
≤ 20	co najmniej 3 min
30, 45 i 60	co najmniej 6 min ¹⁾
≥ 90	co najmniej 10% czasu klasyfikacyjnego ²⁾
¹⁾ Przy przekroczeniu czasu klasyfikacyjnego pomiędzy 3 min i 6 min rozszerzenie również jest możliwe, ale w mniejszym stopniu. ²⁾ Przy przekroczeniu czasu klasyfikacyjnego pomiędzy 5% i 10% rozszerzenie również jest możliwe, ale w mniejszym stopniu.	

Jeżeli element próbny nie utracił swoich właściwości ogniowych w dodatkowym czasie przedstawionym w tablicy 4, możliwe jest zwiększenie jego wysokości o 20%, jak również dopuszczalne jest powiększenie wymiarów (szerokości i wysokości) zastosowanych w nim przeszkleń o taką samą wartość. Powierzchnia „powiększonego” przeszkleń nie może przekraczać 21% powierzchni szyby o wymiarach maksymalnych odpowiednio dla układu pionowego i poziomego. Na bazie powiększonych przeszkleń dopuszczalna jest też zmiana współczynnika kształtu szyby.

Rozszerzony zakres zastosowania zgodnie z normą [135] jest prognozowaniem oczekiwanej klasy odporności ogniowej dla danej ściany przeszklonej. Głównym założeniem w tym przypadku jest to, że dany element po zastosowaniu odpowiedniego rozszerzenia osiągnąłby wymagane właściwości ogniowe, w przypadku gdyby zbadano go zgodnie z EN 1364-1 [109]. Należy tutaj zaznaczyć, że rozszerzony zakres nie dopuszcza takich zmian, jak zwiększenie czasu klasyfikacyjnego (np. z 60 na 90 min) lub klasyfikacji z uwagi na właściwości ogniowe (np. z E na EW). Każde rozszerzone zastosowanie

powinno być przedmiotem oddzielnej oceny. Tworzenie kombinacji rozszerzeń dopuszcza się tylko pod warunkiem, że kombinację tą można uzasadnić, przedstawiając dokumentację badawczą lub istniejące wcześniej wyniki badań. Jeżeli przyjęto już jakieś rozszerzone zastosowanie, to można wykorzystać je także w nowym rozszerzonym zastosowaniu, pod warunkiem że nowe zmiany nie będą sprzeczne z żadną z zasad wykorzystanych do ustalania pierwszego rozszerzonego zastosowania. Najistotniejsze z rozszerzeń przedstawionych w normie [135] omówione zostały w artykułach [67], [76].

3. STAN WIEDZY DOTYCZĄCEJ OCENY ODPORNOŚCI OGNIOWEJ PIONOWYCH PRZEGRÓD PRZESZKLONYCH Z UWZGLĘDNIENIEM EFEKTU SKALI

3.1. Analiza dostępnej literatury

3.1.1. Informacje ogólne

W czasie rozpoznawania zagadnienia stanowiącego problem naukowy postawiony w rozprawie doktorskiej [1] analiza dostępnych danych literaturowych nie dostarczała wystarczających informacji niezbędnych do analitycznego szacowania odporności ogniowej wielkogabarytowych przeszklonych przegród. Nie odnaleziono w tamtym czasie istniejących publikacji dotyczących efektu skali w ocenie odporności ogniowej czy też szacowania odporności ogniowej wielkogabarytowych przegród przeszklonych. Istniał natomiast szereg publikacji pokrewnych, w których zawarte były informacje dotyczące podstawowej wiedzy niezbędnej do rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozdziale 1.

3.1.2. Historia badań odporności ogniowej

Historia badań odporności ogniowej została szeroko opisana w artykułach [138], [139] opublikowanych w 1978 r. Pierwsze badania ilościowe, mające na celu sprawdzenie jak oddziaływanie ognia wpływa na różnego rodzaju konstrukcje budowlane, prowadzone były od końca XIX w. w Niemczech, a pierwsza norma badawcza opublikowana została w Stanach Zjednoczonych na początku XX w. Prekursorów badań ogniowych należy jednak poszukiwać w Anglii, ponieważ to tam w 1790 r., zgodnie z informacjami zawartymi w [140], przeprowadzono pierwsze badanie odporności ogniowej. Testy przygotowano dla dwóch rodzajów stropów, które nagrzewane były przy użyciu paliwa powstałego z mieszanki wiórów drewnianych i beczek. Podczas badań, trwających od godziny do dwóch, prowadzone były jedynie obserwacje, które wykazały, że ogień, ale nie dym, został skutecznie powstrzymany.

Jak podaje autor publikacji [139], pierwsze badanie odporności ogniowej ścian przeprowadzone zostało w 1894 r., a informacje na jego temat odnaleźć

można w raporcie [141]. Testy przeprowadzono w celu porównania właściwości ogniowych ścian drewnianych z zastrzeżonym systemem paneli ściennych. W celu przeprowadzenia badań wybudowano dwie identyczne komory testowe, każda o wymiarach $2,01 \times 2,63$ m oraz 2,63 m wysokości. Przygotowane w ten sposób „piece do badań” opalane były belkami jodłowymi nasączonymi ropą naftową. Z komorą do badań sąsiadował pokój obserwacyjny. Badany element został wzniesiony jako przegroda pomiędzy komorą a pokojem obserwacyjnym. Ponadto tym samym materiałem, który zastosowano w elemencie próbnym, wyłożono również sufit i ściany stanowiska badawczego. Komora testowa miała okno oraz obciążoną żeliwną i drewnianą kolumnę, obie zabezpieczone płytą ścienną. Temperatury gazu monitorowano za pomocą wielu wskaźników temperatury topnienia. Właściwości ogniowe ściany zostały określone kilkoma metodami, m.in. zawieszono na niej arkusz cienkiego papieru w celu sprawdzenia zapłonu, a poziom jej nagrzania sprawdzano przez dotyk. W każdym badaniu zużyto 275 kg paliwa. Średnia temperatura gazu wynosiła 1000°C , a długość badania – jedną godzinę. Obserwatorzy testów wspominali o pękaniu szkła okiennego po 5 minutach i lekkim pękaniu i kruszeniu ścian w czasie badania. W przypadku jednego testu kolumna zapadła się po 50 minutach; drugi natomiast trwał całą godzinę.

Kolejne warte odnotowania badania ścian przywołane w publikacji [139] przeprowadzono pomiędzy rokiem 1895 a 1900 [142]. W serii 11 testów wykonanych w Berlinie udoskonalono pomiar temperatury gazu wewnątrz komory badawczej, wykorzystując stożki Segera oraz termopary. Maksymalna temperatura zarejestrowana w komorze pieca wahała się w zakresie od 1000°C do 1100°C .

Na przełomie XIX i XX w. badania ogniowe ścian prowadzono także w Wielkiej Brytanii [143], [144] i w Stanach Zjednoczonych [145]. Anglicy badali nienośną próbkę o szerokości 3,0 m i wysokości 2,1 m, dzielącą przestrzeń komory badawczej. Głównym kryterium była szczelność ogniowa oraz stabilność całej konstrukcji. Wykonano pomiary temperatury na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego, a wkrótce potem rozpoczęto również rejestrację ugięć. W Stanach Zjednoczonych przeprowadzono natomiast serię 15 badań w komorze o wymiarach: 4,4 m długości, 2,9 m szerokości i 2,9 m wysokości. Elementy próbne wykonano wzdłuż dłuższego z boków. Pod komorą znajdował się ruszt, na którym spalano drewno nasiąknięte ropą naftową. Temperaturę pieca mierzono termoparami platynowo-rodowymi w celu osiągnięcia 926°C po 30 minutach, a następnie utrzymania tego poziomu do końca badania. Wszystkie testy trwały 1 godzinę, a jako kryterium sukcesu przyjęto nieprzechodzenie w tym czasie ognia na stronę nienagrzewaną oraz

brak przecieków wody, którą próbka polewana była po badaniu. Co ciekawe, kryterium związane z polewaniem elementu próbnego wodą po badaniu stosowane jest do dzisiaj w Stanach Zjednoczonych, natomiast nie ma go w wymaganiach norm europejskich.

Z badań opisanych w publikacjach [138], [139] na uwagę zasługuje test z 1903 r. przeprowadzony w Stanach Zjednoczonych, ponieważ wówczas po raz pierwszy zastosowano piec do badań. Była to zasilana gazem komora o głębokości zaledwie 32 cm i wymiarach $2,7 \times 3,7$ m (szerokość \times wysokość). Gaz doprowadzany był przez palniki w podłodze, a powietrze dostarczano przez specjalne otwory wykonane z przodu pieca. Temperaturę wewnątrz monitorowano za pomocą krótkich termopar platynowo-irydowych. Element próbny stanowiła ściana o wymiarach $1,8 \times 2,1$ m nagrzewana przez 2 godziny w temperaturze 926°C , która osiągnięta była w pierwszych 30 minutach badania, a następnie utrzymywana do końca testu.

W publikacji [139] omówiono także w jaki sposób powstawała standardowa krzywa temperatura-czas, stosowana do dzisiaj w badaniach odporności ogniowej praktycznie na całym świecie oraz jak kształtowały się kryteria odporności ogniowej, które pomimo zróżnicowanych norm badawczych, charakterystycznych dla danej części świata, w dużej mierze bazują na tych samych założeniach.

Do historii badań odporności ogniowej nawiązują także publikacje [146], [147]. Opisane w nich historyczne badania pokrywają się z tymi omówionymi wyżej, jednakże publikacje te poświęcone są przede wszystkim zagadnieniom związanym z bilansem energetycznym w normowych badaniach ogniowych. Standaryzowane testy ogniowe pomijają bilans energetyczny w pożarze, ponieważ w każdym badaniu wynikowa temperatura musi być taka sama (określona krzywą temperatura-czas z ewentualnym zachowaniem odpowiednich tolerancji). Do utrzymania odpowiedniej temperatury w piecu, w każdym teście wymagana jest inna ilość ciepła, co oznacza, że za każdym razem modeluje się w piecu inny pożar. Z punktu widzenia niniejszej monografii najistotniejsze w analizowanych publikacjach są informacje dotyczące aluminiowych przeszklonych ścian działowych. Z artykułów dowiedzieć się można, że przeszklone ściany działowe wymagają dużej ilości ciepła do utrzymania standardowych warunków badania (średnio powyżej 1,00 MW). Okazało się również, że istnieją duże różnice w szybkości uwalniania ciepła (HRR), które przypisać można fizycznemu zniszczeniu poszczególnych warstw przeszklenia (często obserwuje się, że cała warstwa materiału spada z badanej próbki), a także, że całkowita energia cieplna uwalniana w piecu podczas badań elementów przeszklonych, w przypadku badań próbek o przewidywanej

klasie odporności ogniowej EI 30, wynosi około 2000 MJ. Różnice między rozmiarami pożaru w piecu nie mają żadnego znaczenia w ocenie odporności ogniowej badanych wyrobów, jednakże mogą być bardzo przydatne w zrozumieniu, jak w warunkach pożaru zachowują się różne materiały.

3.1.3. Wymagania norm europejskich oraz polskiego prawa

Publikacje zbliżone tematyką do zagadnienia omawianego w monografii w głównej mierze skupiają się na procedurach badawczych stosowanych do określenia klasy odporności ogniowej danych przegród, sposobie ich klasyfikacji oraz przepisach prawa związanych z elementami tego typu. Wśród nich wyróżnić można artykuły opisujące aspekty związane z bezpieczeństwem pożarowym przeszklonych ścian osłonowych [3], [11], [61]–[66], [68]–[70], [148], [52], [149], [150], [53]–[55], [57]–[60] oraz drzwi [23]–[25], [32], [38], [43], [44], [49], a także opisujące w sposób kompleksowy zagadnienia związane z różnymi typami przeciwpożarowych przegród przeszklonych [8], [14], [111], [151], [15]–[19], [28], [72], [82].

Z uwagi na zawężenie tematyki wyłącznie do nienośnych przeszklonych ścian wewnętrznych największy wkład do monografii mają publikacje opisujące zagadnienia związane z bezpieczeństwem pożarowym konstrukcji tego typu. Podstawowe informacje dotyczące obowiązujących w Polsce przepisów prawa związanych z wewnętrznymi przeszklonymi przegrodami przeciwpożarowymi, metodyki ich badania wraz z przykładowymi wynikami oraz przedstawiające najczęściej stosowane w praktyce rozwiązania konstrukcyjne zawarte są w artykułach [73], [74], [79], [83]. Sposób w jaki elementy przeszklone klasyfikowane są zgodnie z wymaganiami obowiązującymi w Unii Europejskiej, wraz z dopuszczalnym zakresem zastosowania wyników przeprowadzonych badań, został szeroko opisany w pracach [67], [75], [76], [87], [88].

Stan obecnej wiedzy dotyczącej zachowania się konstrukcji aluminiowych w warunkach pożaru przedstawiony został w artykule [152]. Większość z zawartych tam informacji dotyczących właściwości ogniowych aluminium oparta jest na tych zestawionych w normie EN 1999-1-2 [153]. Autorzy sugerują jednak, że w przeciwieństwie do konstrukcji stalowych, przeprowadzono niewiele badań ogniowych konstrukcji aluminiowych oraz, z uwagi na to, że profile wykonane z aluminium stosowane są od niedawna, nie mamy zbyt dużego doświadczenia związanego z zachowaniem konstrukcji aluminiowych w prawdziwych pożarach. Niedobór dostępnych badań zdaniem autorów prowadzi do wniosku, że zasady projektowania podane w EN 1999-1-2 [153] wymagają poprawy. Z punktu widzenia niniejszej monografii najistotniejsze

informacje zawarte w [152] dotyczą zachowania konstrukcji aluminiowych w danej temperaturze. Zgodnie z nimi stopy aluminium topią się między 600°C a 650°C, przy czym dokładna wartość zależy od rodzaju rozważanego stopu, zaś pomiędzy 200°C a 250°C większość stopów traci już około 50% swojej pierwotnej wytrzymałości dostępnej w temperaturze pokojowej. Z uwagi na to, że temperatura występująca w warunkach pożaru może być o wiele wyższa od temperatury topnienia aluminium, praktycznie we wszystkich przypadkach stopy aluminium muszą być zabezpieczone (izolowane), aby spełnić określone wymagania dotyczące odporności ogniowej.

3.1.4. Przeszkłone ściany działowe o określonej konstrukcji

Wśród dostępnej literatury znaleźć można wiele publikacji opisujących zachowanie się w warunkach pożaru przeszkłonych ścian działowych o określonej konstrukcji.

W pracach [81], [84] omówione zostały wyniki badań ścian, w których profile słupów oraz rygli wykonane były z elementów drewnianych. Konstrukcje tego typu, z uwagi na ograniczenia polskiego prawa budowlanego [154], nie są stosowane tak powszechnie, jak te oparte na szkielecie metalowym, a swoje zastosowanie znajdują głównie w budownictwie zabytkowym. Wyniki przywołanych prac pokazują jednak, że ściany z profilami drewnianymi, wykonane w odpowiedni sposób, stanowić mogą doskonale przegrody przeciwpożarowe. Niewielkie deformacje drewnianych profili słupów wpływają korzystnie na ich właściwości związane ze szczelnością ogniową. Dodatkowo, z uwagi na właściwości drewna, cechują się one bardzo dobrą izolacyjnością ogniową. W przypadku profili o odpowiednio dobranych przekrojach temperatura przyrasta w bardzo wolnym tempie, zaś w warunkach oddziaływania ognia drewno zwęglą się, tworząc warstwę izolacyjną. Warstwa zwęglona nie ma praktycznie żadnych właściwości nośnych, dlatego też istotne jest dobranie odpowiedniej grubości profili i/lub zastosowanie stalowych mocowań w celu uzyskania oczekiwanej klasy odporności ogniowej.

Z drewna wykonane mogą być także wkłady izolacyjne stosowane jako wypełnienie profili metalowych. Zachowanie konstrukcji tego typu w przypadku pożaru standardowego opisują artykuły [85], [86]. Analizują one zachowanie pod wpływem oddziaływania ognia nietypowego rozwiązania konstrukcyjnego, prezentują, jak duży wpływ na właściwości ogniowe całej konstrukcji ma rodzaj zastosowanego wkładu izolacyjnego [86] oraz jak duże znaczenie w przypadku profili o niesymetrycznym przekroju ma kierunek oddziaływania ognia [85].

Kolejne z analizowanych prac poświęcone są tematyce odporności ogniowej przeszklonych ścian bezszprosowych [78], [90], [92]. Rozwiązania tego typu bazują na systemach profilowych przeszklonych ścian działowych z tą różnicą, że profile słupów zastąpione są specjalnym silikonem ognioodpornym, często uzupełnionym o uszczelkę pęczniącą, a rygle w większości przypadków w ogóle nie występują. Wysokie tafle szklane ustawione są obok siebie w odległości około 5 mm, a szczelinę między nimi wypełnia specjalny silikon. Wąskie łączenia tafli szklanych dają wrażenie ściany wykonanej z jednego kawałka szkła. Aluminiowe, stalowe lub drewniane profile występują jedynie w miejscu łączenia szklanej ściany z innymi elementami budynku, tworząc ramę, w której umieszczone są przeszklenia. Podczas badania w zakresie odporności ogniowej elementy tego typu cechuje dość duże ugięcie, które w konsekwencji spowodować może utratę szczelności ogniowej przed zakładanym czasem. Wysokie szyby zamocowane są praktycznie tylko na górze i na dole, a ich deformacja w kierunku wnętrza pieca, spowodowana działaniem ognia, doprowadzić może do wysunięcia szyby z górnego profilu. Dodatkowo, dość często wartość ugięcia sąsiednich tafli szklanych jest różna, co spowodować może uszkodzenie połączeń pomiędzy przeszkleniami, wzrost temperatury w ich sąsiedztwie oraz powstanie szczeliny mogącej doprowadzić do utraty szczelności ogniowej.

Kolejnym rozwiązaniem opisanym w literaturze są ściany działowe wykonane z pustaków szklanych [80]. W przeciwieństwie do stosowanych w ścianach słupowo-ryglowych i bezszprosowych przeszkleń ognioodpornych zawierających w swej budowie warstwę pęczniącego żelu, pustaki wykonane są jedynie ze szkła o odpowiedniej grubości. Ich wymiary, a w szczególności grubość pustaka, zależne są od oczekiwanej klasy odporności ogniowej.

Wśród dostępnej literatury odnaleźć można także pozycje odnoszące się do zachowania w warunkach pożaru przeszklonych ścian wykonanych z profili aluminiowych, które są przedmiotem monografii. Nie ma w nich informacji dotyczących efektu skali w ocenie odporności ogniowej konstrukcji aluminiowych, co wskazuje na oryginalność problemu naukowego przedstawionego w rozdziale 1. Większość publikacji skupia się na izolacyjności ogniowej w zależności od sposobu zaizolowania profili szkieletu [77], [89], [91], lub też zastosowanego przeszklenia [55]. Analiza przywołanej literatury dostarcza informacji dotyczących wpływu zastosowania dodatkowych wkładów izolacyjnych w zewnętrznych komorach profili szkieletu oraz dodatkowych warstw żelu pęczniącego w budowie przeszklenia na przyrosty temperatury na nienagrzewanej powierzchni aluminiowej przeszklonej ściany działowej w trakcie badania odporności ogniowej. Dodatkowe wkłady izolacyjne profile obniżają zarejestrowany na nich w 30. minucie badania średni przyrost temperatury o 8°C w przypadku rygli,

11°C w przypadku słupów oraz 16°C w przypadku ramy obwodowej. Różnice te po 30. minucie badania zaczynają gwałtownie rosnać, osiągając w 37. minucie (czas zakończenia badania dla ściany z zaizolowaną jedynie środkową komorą profilu) 30°C dla rygli oraz około 24°C dla słupów i ramy obwodowej. Maksymalne wartości średniego przyrostu temperatury dla rygli (130°C), słupów (110°C) oraz ramy obwodowej (100°C) ściany, w której profile aluminiowe wypełnione były tylko w środkowej komorze, osiągnięte na końcu jej badania, w przypadku ściany z zaizolowanymi wszystkimi profilami osiągnięte zostały odpowiednio w 49., 51. i 66. minucie badania. W przypadku szyb zauważyć można, jak bardzo zastosowanie dodatkowych warstw żeluz spowalnia średni przyrost temperatury na ich powierzchni w pierwszej fazie badania oraz jak wydłuża okres, w którym przyrost ten ustabilizowany jest na zbliżonym poziomie. W przykładzie omówionym w publikacji [55] przyrost średniej temperatury na nienagrzewanej powierzchni przeszkleń z dwiema warstwami żeluz wzrasta ze średnią prędkością 8°C na minutę, osiągając w 10. minucie badania 80°C, następnie, do około 17. minuty średnia prędkość przyrostu temperatury słabnie. Średni przyrost temperatury na przeszkleń osiąga wartość 98°C, co daje średnią prędkość przyrostu temperatury około 2,5°C na minutę.

W późniejszej fazie, do około 25. minuty, temperatura na powierzchni przeszkleń obniża się do około 90°C, a po tym okresie ponownie zaczyna gwałtownie wzrastać, osiągając na koniec badania około 132°C. W przypadku szyby z czterema warstwami żeluz, zjawiska występujące podczas badania są podobne, jednakże zachodzą zdecydowanie wolniej. W pierwszych 10 minutach badania prędkość średniego przyrostu temperatury wynosi około 4°C na minutę i utrzymuje się na takim poziomie do 20. minuty badania. Następnie, podobnie jak w przypadku szyby z dwiema warstwami żeluz, prędkość średniego przyrostu temperatury zwalnia. W tym przypadku zwolnienie to jest jednak zdecydowanie większe. W około 32. minucie badania średni przyrost temperatury na nienagrzewanej powierzchni przeszkleń osiąga wartość 92°C, co daje w tej fazie badania średnią prędkość przyrostu temperatury około 1°C na minutę. Następnie temperatura na powierzchni przeszkleń obniża się do około 88°C w 46. minucie i od tego czasu do końca badania rośnie. Przyrost ten nie jest jednak tak gwałtowny, jak w przypadku końcowej fazy badania aluminiowej ściany działowej przeszklonej szybą ogniochronną zawierającą w swej budowie dwie warstwy pęczniącego żeluz. Zauważyć można także, że różnica pomiędzy przyrostami temperatury na obu rodzajach przeszkleń w 30. minucie badania jest stosunkowo niewielka (około 10°C), jednakże przyrost temperatury wynoszący w tym czasie 101°C dla przeszkleń z dwiema warstwami żeluz, w przypadku czterech warstw żeluz osiągnięty zostaje dopiero

w 58. minucie badania, co pokazuje jak duży wpływ na zwiększenie izolacyjności ogniowej ma zastosowanie dodatkowych warstw materiału aktywnego w budowie przeszklenia.

W 2019 r. opublikowana została praca [155], w której przedstawiono porównanie zachowania różnych rodzajów konstrukcji przeszklonych ścian działowych w badaniach w zakresie odporności ogniowej. Celem artykułu było ukazanie różnic pomiędzy znanymi rozwiązaniami konstrukcyjno-materiałowymi przeszklonych ścian działowych w kontekście odporności ogniowej, na podstawie wartości przemieszczeń powstających w nich pod wpływem działania płomieni. Zdaniem autorów parametr przemieszczenia, niemający bezpośredniego wpływu na ocenę klasy odporności ogniowej przegrody, jest bardzo istotny z uwagi na zachowanie szczelności ogniowej. Jednym z trzech aspektów oceny szczelności ogniowej, o czym pisano w rozdziale 2.4.4.2, jest wystąpienie pęknięć lub otworów przekraczających dopuszczalne rozmiary, a ugięcia ram mogą być powodem powstawania takich uszkodzeń. W pracy [155] porównano wyniki badań w zakresie odporności ogniowej ściany bezszprosowej oraz ścian działowych wykonanych z takiego samego przeszklenia zamontowanego w ramach wykonanych z profili drewnianych, stalowych i aluminiowych. Pomimo, iż porównywane w badaniach próbki różniły się znacząco pod względem schematu konstrukcyjnego, wielkości szyb oraz sposobu ich zamocowania, a jedyną cechą wspólną było to samo przeszklenie oraz zbliżone (zdaniem autorów) gabaryty konstrukcji, to przedstawione w artykule wyniki dają pewien pogląd na zachowanie się różnego rodzaju przeszklonych ścian działowych w warunkach pożaru standardowego. Na podstawie zaprezentowanej w artykule analizy porównawczej stwierdzono, że konstrukcja wykonana z kształtowników stalowych cechowała się największą podatnością na ugięcie (204 mm w kierunku wnętrza pieca w 30. minucie badania) pod wpływem wysokiej temperatury.

Najmniejsze ugięcia zarejestrowano natomiast dla ściany bezszprosowej (3 mm w kierunku wnętrza pieca od 20. minuty badania) oraz ściany drewnianej (11 mm w kierunku na zewnątrz pieca). Przeszklona ściana aluminiowa cechowała się ugięciem rzędu 50 mm, osiągniętym w 10. minucie badania. Wyniki przedstawionego porównania nie są zaskakujące, ale zauważyć można jedno bardzo ciekawe zjawisko – ugięcie ścian bezszprosowych, ścian o profilach drewnianych oraz ścian ze stalowymi profilami zwiększało swoją wartość wraz z upływem czasu badania, natomiast w przypadku ściany aluminiowej największą wartość zarejestrowano w 10. minucie badania, następnie wartość ugięcia zmniejszała się. Podobne zjawisko zostało zaobserwowane także w badaniach przeprowadzonych na użytek niniejszej monografii.

3.1.5. Przeszklenia ognioodporne

W artykule [55], dotyczącym aluminiowych przeszklonych ścian działowych, a dokładniej temperatury zarejestrowanej na nienagrzewanej powierzchni przeszkleń, w opisanych badaniach zastosowano szyby z żelem o takim samym składzie, a izolacyjność ogniowa przegrody zwiększona została przez zastosowanie dodatkowych warstw żelu.

Badania opisane w [156] wskazują, że izolacyjność ogniowa może zostać podniesiona także poprzez dobranie odpowiednich proporcji składników chemicznych tworzących warstwę pęczniącą pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury. W przywołanej publikacji weryfikowana była izolacyjność ogniowa przeszklenia z jedną warstwą żelu wykonanego z materiału zawierającego różny stosunek molowy dwutlenku krzemu (SiO_2) do tlenku sodu (Na_2O). Na potrzeby badania wykonano cztery mieszanki, w których stosunek $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ wynosił odpowiednio 2,0; 3,0; 4,0 oraz 5,0. Warstwa wykonanego w ten sposób żelu umieszczona została między dwoma taflami szkła typu float.

Badania przeprowadzono na stosunkowo niewielkich próbkach (100×100 mm), a nagrzewanie elementów próbnych nie było prowadzone w standardowym piecu do badań odporności ogniowej, tylko przy użyciu specjalnej lampy generującej po nienagrzewanej stronie próbki stałą temperaturę wynoszącą około 1000°C . Uzyskane wyniki pokazują jak poprzez opisaną wcześniej manipulację składem żelu wpłynąć można na izolacyjność przegrody. Osiągnięte w badaniach przyrosty temperatury na szybach sugerują według autorów publikacji, że stabilność termiczną próbki żelu można poprawić przez zwiększenie zawartości krzemionki. Co ciekawe, najwyższą izolacyjność ogniową utrzymaną przez 40 minut uzyskano w badaniu przy molowym stosunku $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ wynoszącym 4,0. Przy stosunku 2,0 i 3,0 wynosiła ona odpowiednio 13 i 15 minut, a gdy stosunek $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ w żelu wynosił 5,0 izolacyjność ogniowa przeszklenia została zachowana przez 32 minuty. Przeprowadzona w ramach badań analiza termogravimetryczna wykazała, że rozkład próbek żelu rozpoczyna się w temperaturze około 100°C , co może być spowodowane odparowaniem wody i uwolnieniem innych lotnych związków z żelu. Im wyższy stosunek molowy SiO_2 do Na_2O , tym wyższa temperatura, w której rozpoczyna się rozkład. Ponadto pozostałość względem wyjściowej masy żelu w temperaturze 800°C rośnie wraz z zawartością SiO_2 w żelu. Mieszanka żelu o stosunku molowym $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ równym 5,0 posiadała najwyższą początkową temperaturę rozkładu wynoszącą $139,3^\circ\text{C}$ oraz najwyższą pozostałość wynoszącą 84,2% w temperaturze 800°C . Wskazuje to, że stabilność termiczna

próbki w wysokich temperaturach może ulec poprawie wraz ze wzrostem zawartości krzemionki w żelu. Można to wyjaśnić faktem, że wyższa zawartość SiO_2 w żelu podczas ogrzewania przyczynia się do utworzenia bardziej zwartej i grubszej warstwy spęczniałego materiału, co z kolei skutkuje lepszą izolacją termiczną próbki w wysokiej temperaturze.

Ten interesujący efekt odwraca się jednak, gdy stosunek molowy SiO_2 i Na_2O wzrasta do 5,0. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań zaobserwowano, że taka mieszanka charakteryzuje się mniejszą utratą masy w temperaturze 800°C , ale niższą izolacyjnością ogniową w porównaniu do mieszanki o stosunku molowym $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ wynoszącym 4,0. Oznacza to, że chociaż pozostałość jest wymagana do utworzenia warstwy pęczniejącej, duża ilość resztkowa nie jest jedynym powodem lepszej izolacji termicznej. Szczelność ogniowa dla wszystkich z przebadanych przeszkleń została zachowana przez 45 minut badania, jednak biorąc pod uwagę fakt, że próbki miały niewielkie rozmiary, parametr ten nie jest tak istotny, jak izolacyjność ogniowa.

Opis badań nad żelem zawartym w ogniochronnych szybach zawarto w pracy [120]. Publikacja ta nie zajmowała się odpornością ogniową przeszkleń, lecz toksycznością produktów spalania powstałych w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury na szyby ogniochronne. Skład chemiczny większości szkielek ognioodpornych jest utajniony przez producentów. Krzemian sodu (zawarty w żelu w poprzednim z omawianych badań), czy też krzemian wapnia w postaci półstałej lub stałej, pod wpływem wysokiej temperatury tworzą odpowiednie struktury mogące stanowić barierę ogniową. Te materiały są najprawdopodobniej najczęściej stosowane do wytworzenia pęczniejącego żelu, ale możliwe jest również, że dodaje się do nich inne produkty, aby je ustabilizować. Aspekt dotyczący toksyczności produktów spalania jest istotny, przede wszystkim ze względu na fakt, że główną przyczyną śmierci osób dotkniętych pożarem nie jest bezpośrednio oddziaływanie ognia czy wysokiej temperatury, a zatrucie wywołane gazami powstałymi w procesie spalania. Na potrzeby pracy [120] przeprowadzono badanie składu oraz zachowania pod wpływem oddziaływania podwyższonej temperatury żelu stanowiącego warstwę ochronną w sześciu różnych przeszkleniach ognioodpornych dostępnych na chińskim rynku. Skład i zachowania termiczne warstw ochronnych zmierzono za pomocą rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronowej (XPS), spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), termogravimetrii FTIR (TG-FTIR), pirolizy – chromatografii gazowej – spektrometrii mas (Py-GC-MS) oraz spektroskopii FTIR ze sprzężonym piecem rurowym (TF-FTIR). Badania wykazały, że wśród przebadanych żelów, zgodnie z wynikami XPS i FTIR, wyróżnić można dwa rodzaje. Jeden składał się z wody, soli rozpuszczalnej

w wodzie i poliamidu z możliwą obecnością alkoholi, a drugi z krzemianów metali z możliwą obecnością karboksylanów i alkoholi. Dodatkowo charakterystyka FTIR wykazała, że drugi rodzaj zawierał znacznie mniej wilgoci niż pierwszy. Podczas ogrzewania w każdej z trzech metod badań (TG-FTIR, Py-GC-MS i TF-FTIR) ze wszystkich próbek wydzielały się para wodna, dwutlenek węgla i gazy chlorowodorowe, przy czym w przypadku drugiego z wyróżnionych typów zawartość chlorowodoru była niższa. W podsumowaniu autorzy [120] stwierdzili jednak, że pomimo, iż wyniki przeprowadzonych badań dostarczają ważnych informacji dla zrozumienia możliwego zachowania się szyb ognioodpornych, to potrzebne są bardziej szczegółowe testy w celu określenia ilości gazów emitowanych ze spalania szkła podczas prawdziwych pożarów oraz oszacowania parametrów toksyczności.

W przeszkleniach przeciwpożarowych w celu zapewnienia odpowiedniej izolacyjności ogniowej w miejsce grubej warstwy żeluz można zastosować także jego cienkie warstwy, tworząc wielowarstwowe szyby laminowane. W artykule [119] omówiono zachowanie laminowanych szyb z przezroczystymi warstwami polimerowymi. W badaniach zastosowano przeszklenia warstwowe o całkowitej grubości 24 mm, składające się z pięciu warstw szkła krzemianowego o grubości 4 mm, rozdzielonych czterema warstwami polimerowymi o grubości 1 mm. Przebadane zostały próbki o wymiarach 500 × 500 mm (szerokość × wysokość), a ich nagrzewanie prowadzone było według standardowej krzywej temperatura-czas, odpowiadającej tej stosowanej w badaniach odporności ogniowej.

Oprócz zbadania zależności przyczepności pomiędzy szkłem a warstwą polimerową kompozycji, wyznaczono optymalną zawartość dodatków uniepalniających w ognioodpornej warstwie. Przeanalizowano procesy zachodzące w przeszkleniu podczas badań ogniowych oraz mechanizm tworzenia się polimerowej warstwy, która zapobiega rozprzestrzenianiu się ciepła i zmniejsza jego przepływ z nagrzewanej powierzchni przeszklenia. Na podstawie przeprowadzonych badań zaprojektowano wieloskładnikową kompozycję polimerową i dobrano optymalny stosunek składników uniepalniających, zapewniający przeszkleniu osiągnięcie klasy odporności ogniowej EI60. Wyniki zawarte w artykule [119] wskazują na to, że warstwy odpowiednio wykonanej cienkiej folii ogniochronnej sprawdzają się w warunkach pożaru tak samo dobrze, jak opisane wcześniej grubsze warstwy pęczniejącego żeluz.

Tematyka przeszkleń ognioodpornych zawierających w swojej budowie warstwy pęczniejącego żeluz poruszana była także w literaturze polskojęzycznej. W 1998 r. powstała publikacja [157] zajmująca się problematyką zastosowania przeszkleń przeciwpożarowych w budownictwie oraz kryteriami, które powinny

one spełniać z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe. W [157] omówiono metodykę klasyfikacji przeszklonych elementów w zakresie odporności ogniowej zgodnie z obowiązującymi wówczas normami: PN-90/B-02851 [158], DIN 4102-5 [159] oraz ISO 834/75 [160]. W publikacji zauważono, że wymagania stawiane klasom odporności ogniowej powyżej EI 30, określonym w normie [160] i w dużej mierze zbliżonych do tych obowiązujących obecnie, spełniają jedynie przeszklone zawierające w swej budowie specjalną warstwę (lub warstwy) żeluz lub folii, które w pierwszej fazie nagrzewania elementu próbnego posiadają właściwości ciepłochłonne, a przy dalszym nagrzewaniu nabierają właściwości izolacyjnych. Ponadto w omawianym artykule poruszono szereg innych aspektów związanych ze stosowaniem przeszkleń w budownictwie. Zasygnalizowano m.in. problem dotyczący wydzielania się dużej ilości dymu z warstwy pęczniającej pod wpływem wysokiej temperatury oraz fakt, że to nie tylko szkło decyduje o odporności ogniowej danej przegrody, a pozornie drobne błędy projektowe, czy też montażowe mogą znacząco wpływać na obniżenie klasy odporności ogniowej danej przegrody przeszklonej. W lekkich ścianach działowych równie ważne, jak zastosowanie odpowiedniego przeszklone, jest także właściwe wykonanie ram, w których jest ono zamocowane oraz dobór odpowiedniego zamocowania i uszczelnienia. Co ciekawe autorzy [157] sugerowali konieczność klasyfikacji elementów przeszklonych w klasach EI-M, łączących odporność ogniową z odpornością mechaniczną oraz klasach EW, określających natężenie promieniowania ciepłego – jednak żadne wymagania dotyczące tych właśnie klas nie zostały wprowadzone w polskich warunkach technicznych [94]. Klasa EW w przypadku elementów przeszklonych ma swoje zastosowanie w kilku państwach Unii Europejskiej, natomiast specyfika badania niezbędnego do wykonania dla klasy EI-M sprawia, że jej osiągnięcie dla przegród przeszklonych jest praktycznie niemożliwe.

W pracy [116] w dokładny sposób opisano rodzaje przeszkleń ognioodpornych dostępnych w tamtym czasie na rynku polskim. W przypadku szyb mających właściwości izolacyjne przeszklone podzielone zostały na szyby wielowarstwowe oraz szyby z żeluz w grubej warstwie. Pierwsze z wymienionych odpowiadają opisanym w pracy [119], przy czym według autora najczęściej jako warstwa aktywna pomiędzy taflami szkła stosowana jest przekładka ogniochronna z żeluz zasadowo-krzemianowego. W temperaturze około 120°C przekładka „pieni się” – pęcznieje (rozszerza prawie 20-krotnie) i matowieje, pochłaniając energię ciepłą wytwarzaną przez ogień. Podczas dalszego działania ognia następuje powolny rozkład przekładki i ciepło jest przekazywane do następnej warstwy, która zaczyna reagować. Proces powtarza się przy każdej warstwie, aż szkło i przekładki zostają całkowicie zużyte.

Szyby z żelcem w grubej warstwie, odpowiadające tym przebadanym w ramach prac [120], [156], składają się z szyb oddzielonych komorami o szerokości około 5 mm, wypełnionymi przezroczystym wodnistym żelcem, reagującym na temperaturę, co pozwala na absorpcję energii cieplnej emitowanej przez ogień. W czasie pożaru żel pęcznieje, wytwarzając ściankę izolacyjną – stanowiącą nieprzepuszczalny ekran cieplny. Oprócz właściwości ogniowych ww. szyby w [116] opisane zostały także te związane z ich normalnym użytkowaniem. Zgodnie z zawartymi w publikacji informacjami szyby wielowarstwowe muszą być chronione przed promieniami UV oraz wilgocią, nie mogą być też narażone na działanie zarówno zbyt niskiej, jak i zbyt wysokiej temperatury. Przy ich montażu konieczne jest stosowanie podkładek mocujących z twardego drewna lub jego zamiennika o odpowiedniej twardości, aby nie uszkodzić krawędzi szkła i taśmy aluminiowej zabezpieczającej żel przed działaniem wilgoci.

Z uwagi na właściwości użytego żelcu szyby należy chronić przed działaniem kwasów i silnych rozpuszczalników (np. do uszczelniania należy używać silikonu neutralnego). Szkło wielowarstwowe zapewnia przezierność zbliżoną do tej, jaką ma szkło typu float tej samej grubości. Przekładki zwiększają jego izolacyjność akustyczną, a także powodują, że staje się szkłem bezpiecznym. Przy jego pękaniu odłamki szyby trzymają się leżącej wewnątrz warstwy żelcu – nie powstają więc luźne odpryski o ostrych krawędziach. W przypadku drugiego rodzaju szyb izolacyjnych żel zawarty w ich budowie nie jest wrażliwy na promieniowanie UV i działanie wilgoci, ale jest stabilny w określonym zakresie temperatury (od -15°C do $+45^{\circ}\text{C}$). Uzyskiwane w ten sposób szkło ognioochronne może być łączone w zestawy przez laminowanie lub zespalanie z różnymi innymi gatunkami szkła (może być stosowane również ze szkłem giętym). Poza przeciwpożarowymi, spełnia ono również dodatkowe wymagania dotyczące: bezpieczeństwa, statyki, kontroli termicznej, odporności na atak, redukcji hałasu itp.

Oprócz omówionych wyżej szyb izolacyjnych w artykule [116] jako ognioochronne wymienione zostały także szyby monolityczne, o których zachowaniu w warunkach pożaru powstało wiele interesujących publikacji naukowych, omówionych w dalszej części rozdziału 3.1.5. Szyby tego typu mają postać pojedynczej tafli szkła. Przeważnie są wykonywane ze szkła sodowo-wapniowego wzmocnianego termicznie, mogą też być zbrojone siatką stalową. Szklą zbrojone wytwarzane są metodą walcowania i występują w odmianie polerowanej całkowicie przezrzystej lub odmianie ornamentowej, półprzezrzystej, dzięki fakturze naniesionej na powierzchnię szkła. Niektórzy producenci do produkcji szkła ognioochronnego wykorzystują szkło borokrzemowe (borosilikatowe), mające większą odporność na temperaturę od sodowo-wapniowego. Do 40 minut

znormalizowanego pożaru trwa ono „sztywno” w ramie, jest też odporne na działanie wody gaśniczej (np. automatyczne zraszacze). Charakteryzuje się niższą rozszerzalnością termiczną w porównaniu do szkła sodowo-wapniowego. Szkła monolityczne odznaczają się odpornością na promieniowanie UV i posiadają cechy pojedynczego szkła bezpiecznego. W przeciwieństwie do szyb z warstwami aktywnymi zachowują przejrzystość w pożarze, co ułatwia działanie straży pożarnej. Dodatkowo w artykule [116] omówione zostały dostępne w tamtym czasie na rynku polskim rodzaje przeszkleń przeciwpożarowych oraz systemy ramowe, w których były one osadzone.

Polskie publikacje zajmujące się tematyką przeszkleń ognioodpornych uzupełniają trzy powstałe w latach 2015–2019 [117], [118], [151].

W artykule [117], oprócz ciekawego rysu historycznego opisującego początki przemysłowego wytwarzania szkła stosowanego w budownictwie, odnaleźć można także inne niż w [116] podejście do podziału szyb na rodzaje. Autorzy publikacji w swoim podziale odnoszą się do klas odporności ogniowej, jakie mają konstrukcje z danym rodzajem przeszklecia.

Wyróżniono tutaj szyby zapewniające: szczelność ogniową i izolacyjność ogniową (typu EI), szczelność ogniową i ograniczające strumień promieniowania cieplnego (typu EW) oraz zapewniające tylko szczelność ogniową (typu E). Szyby typu EI gwarantują nieprzedostawanie się ognia na nienagrzewaną stronę elementu oraz nieprzekroczenie przyrostu średniej oraz maksymalnej temperatury na powierzchni nienagrzewanej o więcej niż odpowiednio 140°C oraz 180°C. Szyby typu EW zapewniają nieprzedostanie się ognia na nienagrzewaną stronę elementu i nieprzekroczenie przez strumień promieniowania cieplnego, mierzony w odległości 1,0 m od tych elementów, wartości 15 kW/m². Szyby typu E zapewniają tylko nieprzedostanie się ognia na nienagrzewaną stronę elementu. Oprócz podziału z uwagi na klasę odporności ogniowej w [117] przedstawiono także podział z uwagi na budowę szyb, który zbliżony jest do omówionego w [116], z tą różnicą, że szyby nazwane w nim szybami z żelem w grubej warstwie, w pracy [117] otrzymują nazwę szyb komorowych. Dodatkowo podział uzupełniony jest dokładnym opisem zachowania obu rodzajów szyb w badaniach w zakresie odporności ogniowej. W podsumowaniu, podobnie jak w publikacji [157], autorzy podkreślają, że przeszklecie jest tylko jednym ze składowych elementów przegrody i nie tylko ono wpływa na odporność ogniową całego elementu. Zwracają także uwagę na istotny fakt, że normowe badanie odporności ogniowej nie ma na celu odwzorowania temperatury i naprężeń mogących występować w warunkach rzeczywistego pożaru, lecz stanowi względną miarę zachowania się konstrukcji i materiałów w warunkach określonych przez charakterystyki i rozmiary badawczych pieców normowych.

Artykuł [118] dotyczy ognioodpornych szyb zespolonych, czyli zespołu składającego się co najmniej z dwóch tafli szkła (z których przynajmniej jedna jest opisana w [117] szybą wielowarstwową lub komorową), oddzielonych jedną lub kilkoma ramkami dystansowymi, hermetycznie uszczelnionego wzdłuż obrzeża, mechanicznie stabilnego i trwałego. Szyby tego typu znajdują swoje zastosowanie w przegrodach zewnętrznych (ściany osłonowe lub wypełniające, zamknięcia otworów, przekrycia dachowe). Zastosowanie szyb zespolonych, dzięki ich właściwościom, pozwala podnieść walory użytkowe budynku oraz zmniejszyć jego zapotrzebowanie na energię. Ponadto przeszklenie tego typu ma na celu jednocześnie zapewnienie nie tylko odporności ogniowej elementom, w których jest zastosowane, ale również odpowiednich właściwości wytrzymałościowych, izolacyjności cieplnej, ochrony przed słońcem oraz ochrony przed hałasem. W artykule [118] przedstawiono szereg wyników badań w zakresie odporności ogniowej w odniesieniu do izolacyjności ogniowej konstrukcji, w których zastosowano przeszklenia zespolone. Zgodnie z wymaganiami norm badawczych w zakresie odporności ogniowej, jeśli budowa elementu jest niesymetryczna, wymagane są badania elementów przy nagrzewaniu z dwóch stron, poza przypadkami, w których można stwierdzić, że jedna ze stron jest słabsza. Z przedstawionych w artykule wyników badań wynika jednoznacznie, że w przypadku izolacyjności ogniowej zdecydowanie lepiej zachowują się szyby poddane badaniu od strony szyby ogniochronnej. Dodatkowa warstwa izolacyjna w postaci pustki powietrznej pomiędzy szybami sprawia, że temperatura na nienagrzewanej powierzchni jest w końcowej fazie badania o kilkadziesiąt stopni Celsjusza niższa niż w przypadku badania z przeciwnej strony. Autorzy zauważyli, że zjawisko to jest niezależne od tego w jakim elemencie badanym zastosowane były przeszklenia zespolone (ściana osłonowa, ściana wypełniająca, drzwi dwuskrzydłowe czy drzwi jednoskrzydłowe), oraz w jakim były one układzie (pionowym czy poziomym). Zauważono także, że powyższe wnioski znalazły odzwierciedlenie w najnowszej wersji norm badawczych dotyczących przeszklonych ścian osłonowych oraz pasów między kondygnacyjnych EN 1364-3 [161] i EN 1364-4 [136], które dopuszczają zastosowanie dodatkowego zespolenia w przypadku gdy badanie przeprowadzone zostało od strony szyby ogniochronnej.

Ostatnia z wymienionych prac polskojęzycznych [151] dotyczy problematyki związanej z wadami mogącymi wystąpić w przegrodach zawierających przeszklenia przeciwpożarowe. Charakterystyczną cechą polskiego rynku budowlanego jest szczególna uwaga, jaką przykładają się do właściwości stosowanych rozwiązań materiałowych z uwagi na ich zachowanie w warunkach pożaru. Wynika to nie tylko z wysokiego poziomu wymagań określonych w polskich przepisach budowlanych, lecz także dobrze funkcjonującego w praktyce systemu weryfikacji

wprowadzanych do obrotu, a następnie instalowanych w budynkach pojedynczych produktów i przegród budowlanych. Niemniej jednak w przypadku rozwiązań ścian przeszklonych, zarówno tych do zastosowań wewnętrznych, jak i zewnętrznych, istnieje ryzyko rozminięcia się deklarowanych charakterystyk skuteczności działania elementu z rzeczywistymi właściwościami. Ma to swoje odzwierciedlenie w zdarzających się niepowodzeniach podczas badań ogniowych tego rodzaju konstrukcji. W publikacji [151] przedstawiono wady mogące wystąpić w przeszkleniach lub w konstrukcjach je zawierających, które są nie do wykrycia gołym okiem, a objawiają się dopiero w trakcie badania w zakresie odporności ogniowej. Wady te wynikać mogą z takich przyczyn, jak niewłaściwy transport i magazynowanie, czy też sezonowanie próbek do badań. Na niepowodzenie badania ogniowego wpływać mogą także ukryte wady produkcyjne oraz niewłaściwe zamocowanie przeszkleń w konstrukcji. W artykule [151] podniesiono też problem dotyczący odpowiedniej grubości przeszklania przeciwpożarowego. Doświadczenie przy badaniach pojedynczych szyb wielowarstwowych lub komorowych wskazuje, że zdarzają się różnice sięgające 3 mm na grubości pomiędzy teoretycznie takimi samymi szybami (ten sam typ oraz producent). Zestawienie tego z faktem, że grubość żeluzetonu rzędu 5 do 7 mm stanowi często jedyną różnicę pomiędzy szybami będącymi elementem składowym konstrukcji o deklarowanej klasie odporności ogniowej EI 30 oraz EI 60, przedstawia dobitnie, jak istotnym jest to zagadnieniem.

W podsumowaniu autorzy zauważyli m.in., że w przypadku wad elementów przeszklonych mamy do czynienia z dwiema możliwościami. Pierwsza z nich dotyczy elementów, w których uszkodzenie jest widoczne i możliwe do usunięcia, zazwyczaj przez wymianę przeszklania oraz druga, kiedy nie ma widocznych uszkodzeń, a istnieje duże ryzyko, że dana przegroda nie zapewni oczekiwanych parametrów bezpieczeństwa. W takim przypadku brak spełnienia zakładanych wymagań można sprawdzić jedynie badawczo.

W przypadku badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, kilka z zastosowanych w elementach próbnych tafli szklanych, pomimo niewidocznych gołym okiem wad, wykazało zachowanie zdecydowanie odbiegające od większości pozostałych, co zostanie przedstawione w dalszej części monografii.

Oprócz przeszkleń zawierających specjalny pęczniący żel, w konstrukcjach ognioodpornych stosowane bywają także ognioodporne szyby monolityczne. W pracy [122], poza metodyką badań i klasyfikacji oraz problemów związanych z ich zastosowaniem na rynku chińskim, opisano także bardzo dokładny sposób zachowania szyb monolitycznych w badaniu odporności ogniowej. Jeśli chodzi o klasyfikację to sposób jej nadawania jest bardzo zbliżony do tego stosowanego w Europie. Zakładane jest jednak z góry, że szyba monolityczna

może być sklasyfikowana tylko z uwagi na szczelność ogniową, a czasy klasyfikacyjne wynoszą 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 i 3,0 godziny. Z informacji przedstawionych w artykule wynika, że badanie ogniowe w Chinach prowadzone jest w podobny sposób, nie ma tam co prawda na tyle szczegółowych informacji, aby można było stwierdzić, że jest identyczne, jednakże piece nagrzewane są podobnie jak w Europie według krzywej standardowej, a szczelność ogniowa sprawdzana jest przy użyciu szczelinomierzy oraz wizualnie (płomień ciągle powyżej 10 s). Jak zauważają autorzy monolityczne szkło przeciwpożarowe powinno być odporne na dużą wartość zmiany temperatury na nienagrzewanej powierzchni w początkowym okresie badania i powinno być odporne na wysoką temperaturę w późniejszym momencie testu. Duża różnica temperatury pomiędzy powierzchnią nienagrzewaną i nagrzewaną prowadzi do naprężenia szkła powodującego jego zarysowanie. W początkowej fazie badania element próbny zawierający szkło monolityczne pęka pod dużym obciążeniem.

W późniejszym okresie szkło staje się miękkie i stopniowo pojawiają się w nim otwory. Ponieważ krawędzie próbki są osłonięte odpowiednio zaizolowaną ramą, a szkło ma słabą przewodność cieplną, więc ta część szkła, która jest bezpośrednio wystawiona na działanie ognia, zmieknie szybciej niż krawędzie próbki. Środkowa część próbki z czasem zaczyna osuwać się pod wpływem siły grawitacji. Obszar pomiędzy górną częścią odsłoniętej powierzchni szkła, a tą znajdującą się w ramie, staje się coraz cieńszy i ostatecznie przerywa się, tworząc otwór, a tym samym powodując utratę szczelności ogniowej. W omawianym artykule poruszono także problem dotyczący zastosowania przeszkleń monolitycznych na rynku chińskim. Podobnie, jak na rynku europejskim, także i w Chinach przyjmuje się, że szyby same w sobie nie mają odporności ogniowej, cecha ta dotyczy całej przegrody. Słaba świadomość tego faktu przez ludzi dokonujących montażu przeszklonych elementów na budowie sprawia, że zdarzają się sytuacje, w których ognioodporne przeszklenia mocowane są w niez izolowanych ramach aluminiowych, a czasem nawet wykonanych z tworzyw sztucznych. Takie konstrukcje nie mają szans na spełnienie swoich zadań związanych z bezpieczeństwem pożarowym.

Wśród dostępnej literatury znaleźć można również prace zajmujące się zachowaniem w warunkach pożaru przegród wyposażonych w zwykle przeszkle- nia, niemające w swej budowie specjalnego żelu pęczniejącego oraz niebędące specjalnie przygotowanymi ognioodpornymi szybami monolitycznymi. Główną wadą przeszkleń przeciwpożarowych jest ich wysoka cena, nie dziwi więc poszukiwanie bardziej ekonomicznych rozwiązań polegających na zastąpieniu szkła przeciwpożarowego zwykłym, w miejscach, w których jego zastosowanie z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego całego obiektu nie powoduje zagrożenia.

Tym problemem zajęli się autorzy publikacji [162]. Artykuł stanowi studium przypadku dotyczącego fasady budynku „The Rotterdam”. Obiekt planowano wybudować na półwyspie znajdującym się na rzece Nowa Moza w Rotterdamie, a z uwagi na jego położenie w pobliżu linii brzegowej, zgodnie z wymaganiami obowiązujących w tamtym regionie, konieczne było wykonanie w obiekcie fasady o odporności ogniowej z każdej strony graniczącej z wodą. Wymaganie to stawiano z powodu transportu niebezpiecznych substancji rzeką Nowa Moza. Autorzy publikacji dokonali kalkulacji w oparciu o scenariusz przewidziany przez Holenderski Komitet ds. Zapobiegania Katastrofom, w którym pożar wywołany jest przez kolizję dwóch statków śródlądowych. Podczas kolizji następuje wylanie się 75 ton łatwopalnej cieczy, prowadzące do pożaru o średnicy 25 m wysokości płomienia prawie 40 m. Pożar ten, biorąc pod uwagę ilość paliwa, zgodnie z założonym scenariuszem może trwać do 30 minut. Strumień promieniowania cieplnego emitowany przez dolną część płomieni wyniesie około 130 kW/m^2 , a przy wyższych poziomach płomienia promieniowanie spadnie do 50 kW/m^2 . Przy założeniu odpowiedniej prędkości wiatru mogącej pojawić się w miejscu wznoszenia obiektu „The Rotterdam” autorzy publikacji wyliczyli, że w przypadku wystąpienia omawianego incydentu elewacje od strony wody poddane zostaną nagrzewaniu o wartości 41 kW/m^2 .

W celu zastosowania odpowiedniego przeszklenia mogącego wytrzymać taki poziom promieniowania, przeprowadzono specjalne badanie ogniowe, w którym oceniany element nie był zamontowany w ścianie przylegającej do komory pieca, a oddalony od niego o 0,25 m, dzięki czemu osiągnięty został odpowiedni poziom nagrzewania poprzez samo promieniowanie, bez wpływu gorących gazów wewnątrz pieca. Nagrzewanie elementów w taki sposób odbiegało od przedstawionego w normach dotyczących badań ogniowych, jednakże było prawidłowe dla przedstawionych wcześniej obliczeń. Autorzy publikacji przebadali kilka różnych konfiguracji szkła, wszystkie bez izolacyjnej szyby ognioodpornej (zawierającej w swej budowie żel pęczniejący). Przeszklenia złożone z pojedynczej szyby zewnętrznej i laminowanej szyby wewnętrznej PVB z powłoką niskoemisyjną zostały przetestowane w ramach aluminiowych i stalowych. Testowano zarówno pirolityczne, jak i wysokowydajne powłoki niskoemisyjne w różnych pozycjach.

W niektórych przypadkach zastosowane szyby składały się ze szkła wzmocnianego termicznie (monolitycznego szkła ognioodpornego). Wyniki osiągniętych badań wykazały, że szyby zespolone zawierające powłokę niskoemisyjną we właściwej pozycji były w stanie wytrzymać strumień ciepła 41 kW/m^2 przez 27 minut i obniżyły poziom promieniowania w odległości 1 m za nienagrzewaną powierzchnią przeszklenia do 2 kW/m^2 , zaś konfiguracja z szybami

wzmacnianymi termicznie nie zawiodła przez 60 minut. Przeszklenia zawierające szkło wzmacniane termicznie zostały przebadane, jak twierdzą autorzy, „zgodnie z europejskimi normami dotyczącymi zewnętrznego oddziaływania ognia”, a konfiguracja szkła wytrzymała nagrzewnie przez 40 minut. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że odpowiednio dobrana konfiguracja szkła laminowanego, powłoki niskoemisyjnej i tafli szkła wzmacnianego termicznie może osiągnąć klasyfikację EW30, a szyba zespolona wykonana w taki sposób jest ekonomicznym rozwiązaniem na elewację budynków narażonych na oddziaływanie pożaru zewnętrznego.

Podczas opracowywania monografii przeanalizowano także wiele innych publikacji dotyczących zachowania w warunkach pożaru zwykłych przeszkleń. Skupiały się one jednak nie na odporności ogniowej przegród, w których mają być zamontowane, a na mechanizmie ich zniszczenia. Tematyka ta odbiega jednak znacząco od problemu naukowego zawartego w monografii, dlatego też opis tych artykułów ograniczono do przedstawienia najważniejszych informacji.

Większość z analizowanych prac skupia się na przeszkleniach stanowiących wypełnienie zewnętrznych przegród. W przypadku wystąpienia pożaru szyby w fasadach mogą pękać i wypadać bardzo łatwo pod wpływem oddziaływania ognia. Powstały w wyniku pęknięcia szkła wlot świeżego powietrza oraz wyrzucenie płomieni na zewnątrz powoduje przyspieszenie rozwoju pożaru zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz budynku. Zachowanie termiczne szklanej elewacji ma zatem ogromne znaczenie w rozprzestrzenianiu się ognia, szczególnie w budynkach wysokich i wysokościowych. Najstarsza z publikacji, podkreślająca wielką rolę zachowania szkła w warunkach pożaru oraz jego pęknięcia pod wpływem temperatury, opracowana została w 1986 r. [163]. W następnych latach przeprowadzono wiele testów w celu zbadania mechanizmu uszkodzenia szyb w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury oraz konsekwencji związanych z tym uszkodzeniem [164]–[176]. Przykładowo w pracy [173] przewidziano teoretyczną krytyczną różnicę temperatury wynoszącą 80°C. W publikacji [172] przedstawiono wyniki badań dla szkła typu float oraz szkła wzmocnionego drucianą siatką. Autorzy publikacji [170], [171] przeprowadzili eksperymenty na pełną skalę w specjalnie wykonanym pomieszczeniu w celu zbadania różnicy w zachowaniu pojedynczego przeszkleń w przypadku różnych miejsc położenia źródła pożaru. W ramach prac [168], [169] opracowano specjalne oprogramowanie, umożliwiające przewidzenie czasu pęknięcia pojedynczych szyb. Na podstawie tych prac ustalono, że przekroczenie wewnętrznego naprężenia cieplnego wywołanego gradientem temperatury jest zasadniczą przyczyną powstania pęknięć w przeszkleniach w pożarze.

W ramach publikacji [166] dane eksperymentalne wykorzystano do weryfikacji modeli termomechanicznych oraz wymiany ciepła wykonanych przy użyciu oprogramowania ABAQUS. Badania przeprowadzono na dwóch laminowanych przeszkleniach, które ogrzewano aż do ich rozbicia przez ogień. Źródłem ognia był kwadratowy basen o wymiarach 500 × 500 mm zasilany N-heptanem w różnej ilości w przypadku dwóch badań. Modele wymiany ciepła opracowane przez oprogramowanie komputerowe zweryfikowano na podstawie zarejestrowanej temperatury na nienagrzewanej powierzchni przeszklenia. W pracy [164] zweryfikowane zostało zachowanie dziewięciu różnych szyb monolitycznych oraz laminowanych poddanych nagrzewaniu przez promieniowanie wytworzone przez specjalny panel grzewczy. Publikacja [176] dotyczyła natomiast tego co dzieje się już po pęknięciu przeszklenia i jakie niesie to za sobą ryzyko dla ludzi ewakuujących się z danego obiektu oraz ekip ratowniczych. Do prac związanych z zachowaniem się zwykłych szyb w warunkach pożaru zaliczyć należy także publikacje [177]–[180], których celem była weryfikacja szyb poddanych jednocześnie oddziaływaniu ognia symulującego pożar oraz wody pochodzącej z instalacji tryskaczowej.

Tematykę związaną z zachowaniem przeszkleń w warunkach pożaru doskonale podsumowuje artykuł [181]. W publikacji przedstawiono obowiązujący w momencie jej wydania stan wiedzy na temat systemów szkła konstrukcyjnego poddawanych obciążeniom ogniowym, ze szczególnym uwzględnieniem aktualnych metod i zagadnień projektowych. Najcenniejszą częścią artykułu jest rozdział opisujący dużą ilość przeprowadzonych do tej pory eksperymentów ogniowych na różnych rodzajach przeszkleń, z których część została także dokładnie przeanalizowana i opisana wyżej. W literaturze można znaleźć szeroki zestaw badań eksperymentalnych mających na celu ocenę głównych skutków wysokiej temperatury, wytrzymałości na rozciąganie i sposób pęknięcia termicznego szkła standardowego. Większość wyników eksperymentalnych jest zgodna, jednak przy uwzględnieniu różnych źródeł wyniki testów mogą również świadczyć o dużym rozproszeniu obserwowanych trendów, jak na przykład w przypadku odporności termicznej szkła. W podsumowaniu autorka zauważa, że cechy szkła oraz jego interakcja z innymi komponentami (tj. systemami ramowymi, sposobem zamocowania itp.) sprawiają, że systemy szybowe są bardzo podatne na zmiany temperatury, a także na łączne skutki obciążeń termicznych i mechanicznych, a zatem wymagają wielodyscyplinarnego podejścia do ich projektowania. Konieczne jest zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji w połączeniu z wieloma aspektami, takimi jak przejrzystość, estetyka i wymagania dotyczące oświetlenia.

3.2. Analiza dostępnych badań przeszklonych ścian działowych

Podczas opracowywania monografii przeanalizowano wyniki 35 badań w zakresie odporności ogniowej aluminiowych przeszklonych ścian działowych. Wyniki badań analizowano pod kątem czasu osiągnięcia danego kryterium odporności ogniowej, maksymalnego przyrostu temperatury osiągniętego na profilach słupów w trakcie badania, maksymalnego ugięcia słupów oraz czasu wystąpienia maksymalnego ugięcia. Szczegółowe zestawienie wyników w formie tabelarycznej znajduje się w rozprawie [1].

Wyciągnięcie jednoznacznych wniosków z analizy dotychczasowych wyników badań, dotyczących realizowanego tematu, było dosyć problematyczne z uwagi na duże zróżnicowanie badanych konstrukcji, zarówno pod względem zastosowanego schematu konstrukcyjnego, jak i materiałów konstrukcyjnych (różne rodzaje profili, sposób ich wypełnienia oraz wzmocnienia, rodzaje zastosowanych przeszkleń). Niemniej jednak podjęta została próba sprowadzenia przebadanych konstrukcji do „wspólnego mianownika”.

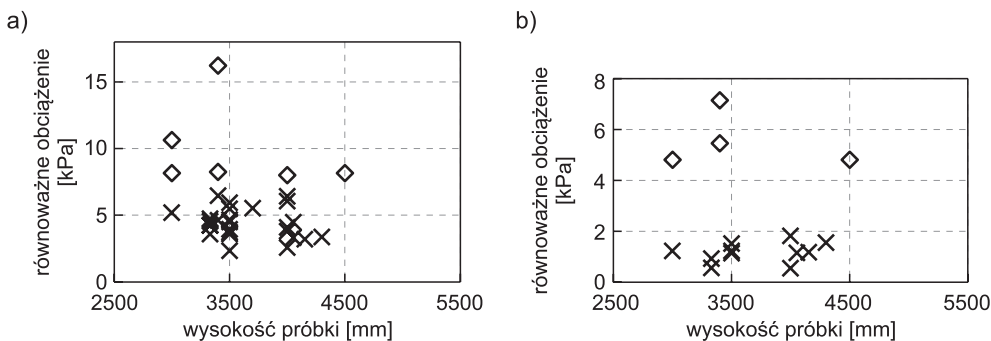
W celu porównania wyników przeprowadzonych badań konieczne było ustalenie wspólnego parametru, w odniesieniu do którego można było porównać zróżnicowane konstrukcje. Założono, że odpowiednim parametrem będzie sztywność mechaniczna całej próbki do badań pod równomiernie rozłożonym obciążeniem.

Do analizy wytypowano 17 przeszklonych ścian działowych, które osiągnęły klasę odporności ogniowej nie większą niż EI 30. Wynikiem analizy była wartość równomiernie rozłożonej siły, jaką należy przyłożyć do próbki, aby osiągnęła ona taką wartość ugięcia, jak maksymalna wartość ugięcia w badaniu. Siła ta została zweryfikowana dla ugięcia słupów centralnych (rys. 23a) oraz słupa na wolnej krawędzi (rys. 23b). Po wykluczeniu wartości odstających znacznie od pozostałych wyników, średnie równoważne obciążenie dla słupów z wolnymi krawędziami wynosiło 1,16 kPa z przedziałem ufności 0,8 kPa, a dla słupów pośrednich 4,4 kPa z przedziałem ufności 2,2 kPa. Przedziały ufności obliczono dla $R = 95\%$. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono w publikacji [182].

Przedziały, w których znajduje się właściwe obciążenie zastępcze, zgodnie z przedstawionymi obliczeniami są dosyć duże i wynikać mogą ze zróżnicowania elementów próbnych, na podstawie badania których obciążenie zostało wyznaczone.

Ponadto należy mieć na uwadze, że obciążenie wywołane oddziaływaniem ognia, związane głównie z degradacją elementu pod jego wpływem oraz

gradientem temperatury, ma zupełnie inny charakter niż równomiernie rozłożone ciśnienie stanowiące obciążenie zastępcze, co zostało omówione w artykule [182]. Niemniej jednak parametr ten stanowić może punkt wyjściowy do dalszych rozważań.



Rys. 23. Wyniki porównania ugięcia i sztywności mechanicznej słupów a) centralnych, b) na krawędzi swobodnej; wartości odstające oznaczono rombami [182]

Obliczenia przeprowadzone w ramach pracy [182] nie rozwiązują jednak problemu naukowego zawartego w monografii. Teoretycznie na ich podstawie możliwe byłoby szacowanie deformacji przeszklonych ścian działowych o dużych wymiarach, jednakże każdorazowo wymagałoby to bardzo czasochłonných obliczeń przeprowadzanych indywidualnie dla danej konstrukcji.

W związku z powyższym jako parametr odniesienia przyjęto sztywność nie całej konstrukcji, a jedynie samego słupa. Profile słupów stanowią główny element konstrukcyjny, którego deformacja jest kluczowa dla zachowania całej ściany w warunkach pożaru. Odniesienie się do sztywności tego elementu pozwala na wyprowadzenie wzorów prostych do zastosowania w praktyce, które zostaną przedstawione w dalszej części monografii.

W związku z brakiem wystarczających informacji do rozwiązania przedstawionego w pierwszym rozdziale problemu naukowego, zarówno w dostępnej literaturze, jak i raportach z badań, niezbędne było przeprowadzenie dodatkowych badań w zakresie odporności ogniowej. W tym celu wykonano osiem badań elementów w pełnej skali. Wstępne wyniki pierwszych sześciu badań zostały szeroko omówione w pracy [183]. Publikacja ta nie rozwiązała ostatecznie problemu naukowego dotyczącego oceny odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych o znacznej wysokości. Dopiero po przeprowadzeniu dodatkowych badań możliwe było opracowanie wzorów przedstawionych w publikacji [184] oraz omówionych w niniejszej pracy.

4. ZAKRES BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH ORAZ PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

4.1. Założenia dotyczące badań

Jak wspomniano w rozdziale 3.2, w związku z brakiem wystarczających informacji do rozwiązania problemu naukowego, niezbędne było przeprowadzenie dodatkowych badań w zakresie odporności ogniowej. Koszty związane z badaniami tego typu sprawiły, że możliwe było przeprowadzenie tylko 8 badań. Do badań wytypowano ścianki o najczęściej spotykanej konstrukcji – słupowo-ryglowe przeszklone ściany działowe o aluminiowych profilach trzykomorowych.

Założono, że pierwsze siedem badań wykonanych zostanie dla próbek o zbliżonej konstrukcji, tj. o takich samych:

- profilach, przy czym część będzie miała odpowiednie profile wzmacniające (zawsze o takich samych wymiarach),
- wkładach izolujących profil, w takiej samej ilości (wypełnienie tylko środkowej komory),
- połączeniach profili,
- przeszkleniach (ten sam typ i producent) oraz w żadnym z badań nie zostaną przekroczone wymiary maksymalne,
- sposobach zamocowania przeszklenia (takie same kątowniki mocujące, rozstawy kątowników, listwy i uszczelki przyszybowe),
- uszczelkach pęczniących (ten sam typ i producent), o takich samych wymiarach.

Ostatnie badanie miało być przeprowadzone dla próbki wykonanej z innych profili lub z zastosowanym innym przeszkleniem niż w przypadku powyższych badań. Ostatecznie zdecydowano o przebadaniu próbki z innym przeszkleniem.

Przed przeprowadzeniem badań zakładano, że zwiększenie wysokości ściany może mieć wpływ zarówno na izolacyjność, jak i szczelność ogniową. W przypadku izolacyjności ogniowej uznano, że zwiększenie wysokości może wpływać na przyrosty temperatury w niektórych miejscach elementów próbnych. Zwiększone ugięcie spowodować może uszkodzenie połączeń pomiędzy słupami i ryglami, jak również wysuwanie się przeszkleń z elementów mocujących, tworząc tym samym szczeliny, przez które przedostawać się będą gorące gazy, wpływające na wzrost temperatury w danych miejscach. Jeśli chodzi

o szczelność ogniową to przekroczenie któregokolwiek z kryteriów, pomijając wady ukryte [111], [151], spowodowane być może jedynie przez zwiększone ugięcie elementu [155]. Opisane powyżej zjawiska dotyczące połączeń profili oraz zamocowania przeszklenia mogą spowodować również pojawienie się płomieni na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego oraz powstanie szczelin o wymiarach przekraczających dopuszczalne wartości.

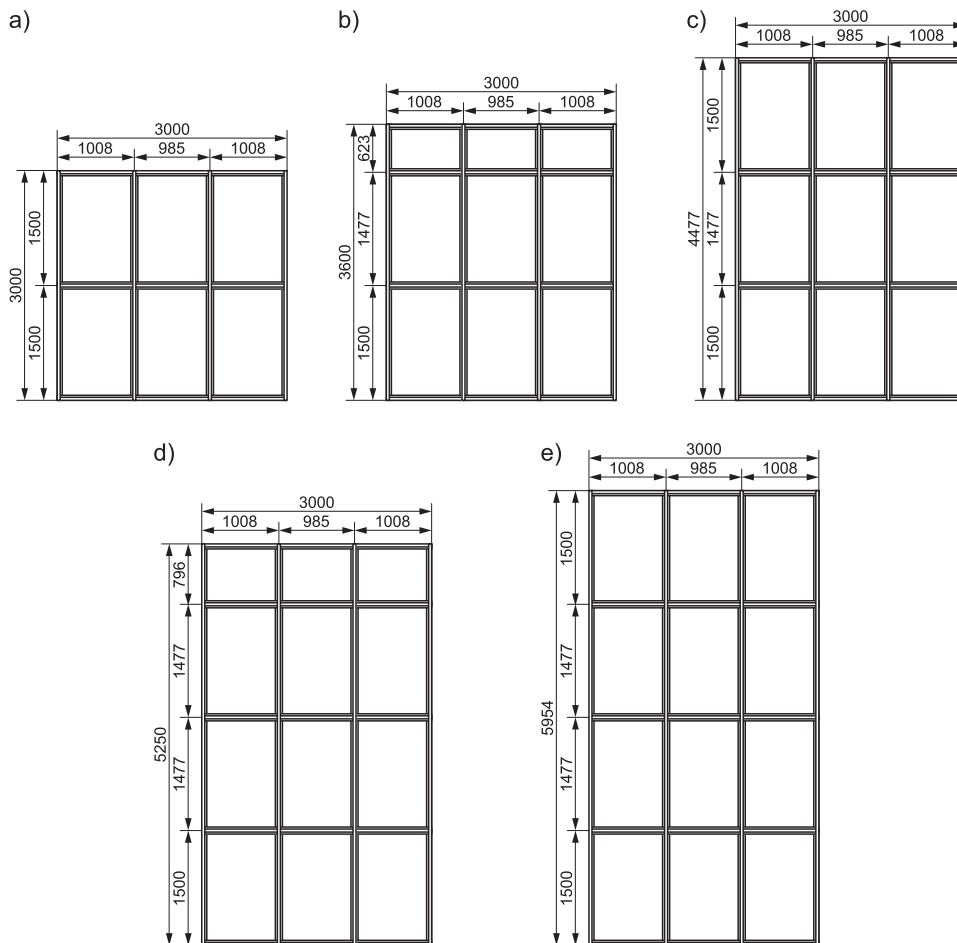
W związku z powyższym założono, że przy zachowaniu wszystkich wymagań związanych z konstrukcją przeszklenia ściany działowej, elementem mającym decydujący wpływ na zachowanie odpowiedniej klasy odporności ogniowej przez ścianę o wymiarach większych niż minimalne określone w normie badawczej [109], będzie jej deformacja. Wartość tej deformacji powinna być natomiast uzależniona od sztywności słupów zastosowanych w konstrukcji ściany. Dlatego też ostatnim z założeń było wyznaczenie na podstawie przeprowadzonych badań zależności pomiędzy sztywnością słupa, a deformacją. Zależność ta pozwalałaby na szacowanie dopuszczalnej maksymalnej wysokości ścian oraz dopuszczalnej minimalnej sztywności słupa dla danej wysokości na podstawie badania próbki o minimalnych wymiarach określonych w [109].

Przebadane elementy próbne zostały opisane w rozdziale 4.2. Podczas badań sprawdzano deformacje elementu próbnego, weryfikowano kryteria związane ze szczelnością ogniową, a także prowadzono pomiar temperatury na nienagrzewanej powierzchni każdej z próbek oraz wewnątrz profili aluminiowych. W przypadku ostatniego badania dodatkowo zweryfikowano zmiany mikrostruktury aluminium pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury. Szczegóły dotyczące prowadzonych pomiarów zestawiono w rozdziale 4.3.

4.2. Elementy próbne

Elementy próbne (rys. 24–28) wykonane były z profili o wymiarach przekroju $46,0 \times 80,0$ mm (szerokość \times głębokość konstrukcyjna) – rysunek 27. Profile zbudowano z dwóch kształtowników aluminiowych o przekroju $46,0 \times 27,0 \times 1,5$ mm (szerokość \times głębokość konstrukcyjna \times grubość ścianki profilu). Kształtowniki połączono dwiema przekładkami termicznymi o wymiarach $34,0 \times 1,8$ mm (szerokość \times grubość przekładki), wykonanymi z poliamidu zbrojonego włóknem szklanym PA 66. Utworzone w ten sposób profile miały konstrukcję trzykomorową. Komora środkowa profilu wypełniona była wkładkami izolacyjnymi z płyt glino-krzemianowych o gęstości 1700 kg/m^3 i wymiarach przekroju $31,5 \times 31,5$ mm. Zewnętrzne komory profili nie były zainstalowane. W przypadku elementów próbnych nr 2–6 profile słupów środkowych

oraz słupa skrajnego na krawędzi swobodnej były dodatkowo wzmocnione przez zamontowany obustronnie aluminiowy profil U o wymiarach przekroju $32,0 \times 47,7 \times 3,0$ mm (szerokość \times głębokość \times grubość ścianki profilu). Elementy próbne nr 1–7 przeszklono szybami typu A o całkowitej grubości 20 mm (rys. 28a), a element próbny nr 8 był przeszklony szybą typu B o całkowitej grubości 17,3 mm (rys. 28b).



Rys. 24. Schematy konstrukcyjne elementów próbnych

Charakterystyka poszczególnych elementów próbnych została przedstawiona w tabelicy 5.

Tablica 5. Charakterystyka poszczególnych elementów próbnych

Nr elementu	Widok	Wysokość [mm]	Schemat konstrukcyjny	Wzmocnienie słupów ¹⁾	Typ przeszklenia ²⁾
1	rys. 25a	3000	rys. 24a	nie	A
2	rys. 25b	3000	rys. 24a	tak	A
3	rys. 25c	3600	rys. 24b	tak	A
4	rys. 25d	4477	rys. 24c	tak	A
5	rys. 26a	5250	rys. 24d	tak	A
6	rys. 26b	5954	rys. 24e	tak	A
7	rys. 26c	5954	rys. 24e	nie	A
8	rys. 26d	4477	rys. 24c	nie	B

¹⁾ Przekrój przez profil słupa bez wzmocnień (oznaczenie „nie”) przedstawiono na rys. 27a, natomiast profilu wzmocnionego (oznaczenie „tak”) na rys. 27b.
²⁾ Przekrój przez przeszklenie typu A przedstawiono na rys. 28a, natomiast szyby typu B na rys. 28b.

Widok nienagrzewanej powierzchni każdego z elementów próbnych przed badaniem w zakresie odporności ogniowej pokazano na rysunkach 25 i 26.

Każdy z elementów próbnych przytwierdzony był do konstrukcji mocującej wzdłuż trzech krawędzi – poziomej górnej i dolnej oraz jednej pionowej, natomiast jedna z krawędzi pionowych pozostawała zawsze niezamocowana, a przestrzeń o szerokości około 30 mm pomiędzy słupem i konstrukcją mocującą wypełniona była wełną mineralną o gęstości 70 kg/m³.

4.3. Pomiary prowadzone podczas badań oraz po ich zakończeniu

Podczas każdego z badań weryfikowano szczelność ogniową oraz izolacyjność ogniową. Pierwsze z kryteriów sprawdzane było wizualnie oraz przy użyciu sprzętu badawczego (szczelinomierze, tampon bawełniany). Izolacyjność ogniową sprawdzano przy użyciu termoelementów rozmieszczonych na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego. Oprócz termoelementów wymaganych przez normę badawczą [109], umieszczono także wiele innych w celu weryfikacji temperatury w charakterystycznych miejscach przeszkłonych ścian działowych, takich jak przeszklenia (oznaczone jako G1–G12), słupy (M1–M4), rygle (T1–T12) oraz połączenia profili (J1–J16). Ponadto podczas badania mierzono deformacje elementu próbnego w jego charakterystycznych

punktach (pomiar wykonany był czujnikami laserowymi, linkowymi lub przy użyciu miarki). Jako przykład, na rysunku 29 przedstawiono rozkład termoelementów, miejsca pomiarów deformacji oraz oznaczenia miejsc charakterystycznych na elementach próbnych o wysokości 4477 mm.



Rys. 25. Widok nienagrzewanej powierzchni elementów próbnych przed badaniem w zakresie odporności ogniowej

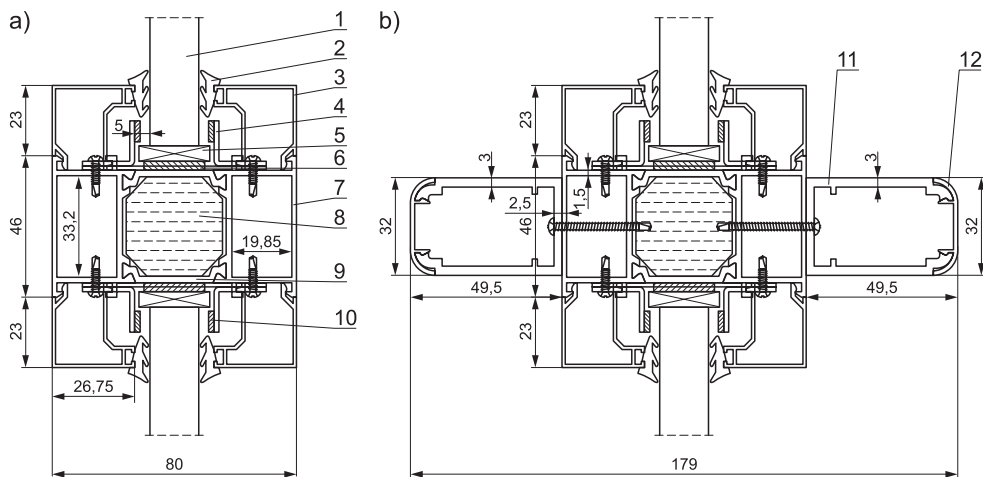
a) element próbny nr 1, b) element próbny nr 2, c) element próbny nr 3, d) element próbny nr 4

Dodatkowo podczas każdego z badań mierzona była temperatura wewnątrz aluminiowych profili. Termoelementy umieszczono dla każdego punktu pomiarowego w środku wysokości profilu. Miejsca, w których prowadzono pomiar przedstawiono na rysunku 30.



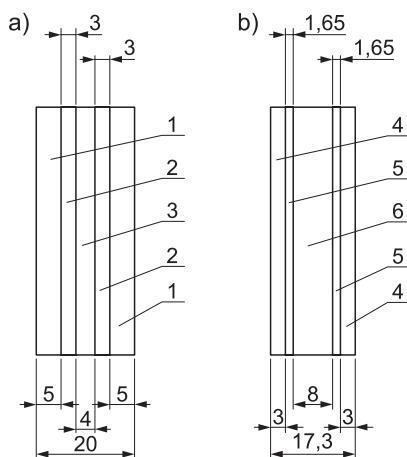
Rys. 26. Widok nienagrzewanej powierzchni elementów próbnych przed badaniem w zakresie odporności ogniowej

a) element próbny nr 5, b) element próbny nr 6, c) element próbny nr 7, d) element próbny nr 8



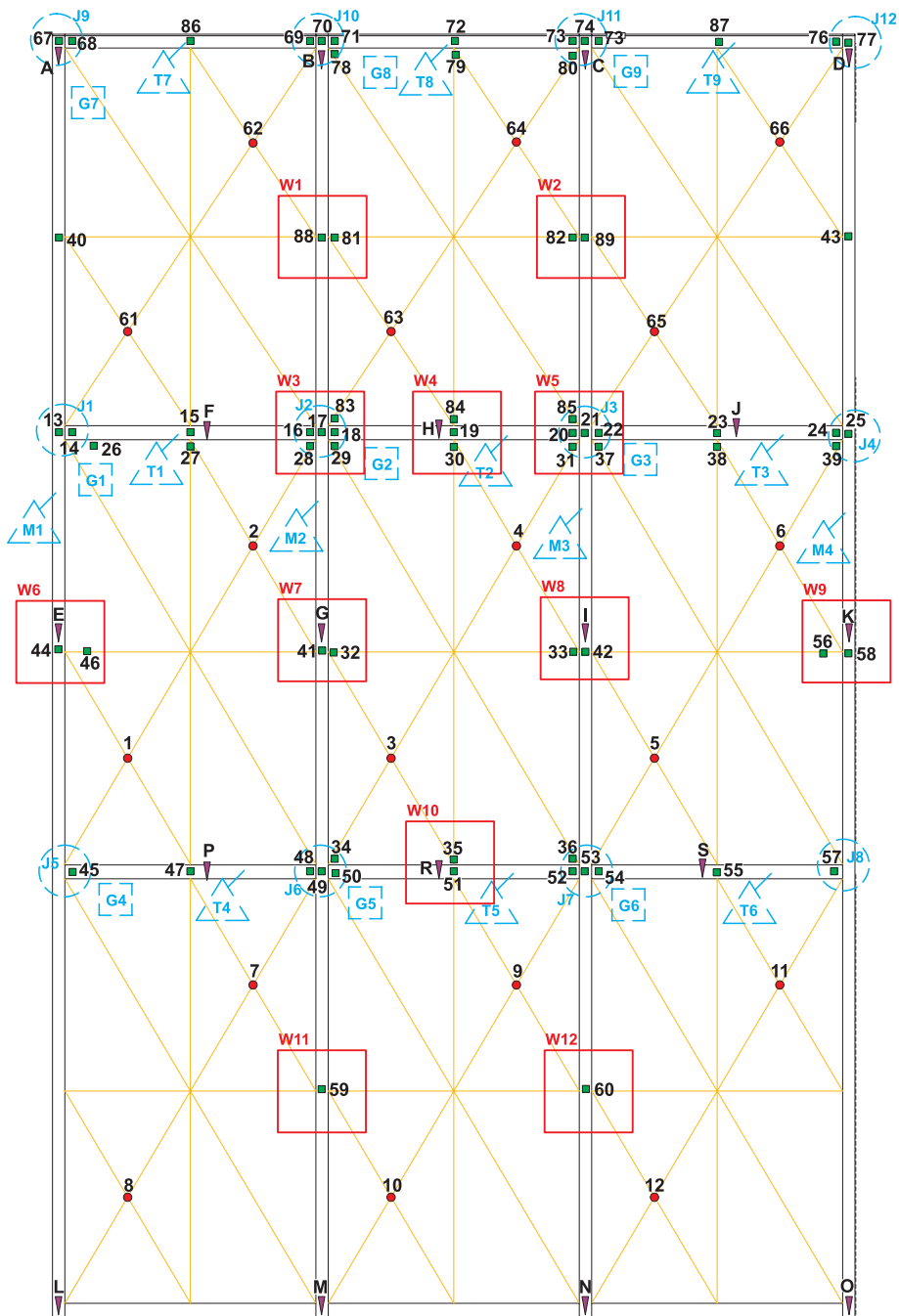
Rys. 27. Przekroje przez profile słupów

a) bez wzmocnień, b) z wzmocnieniami; 1 – przeszklenie, 2 – uszczelka przyszybowa, 3 – listwa przyszybowa, 4 – kątownik mocujący przeszklenie, 5 – podkładka podszybowa, 6 – uszczelka pęczniająca, 7 – kształtownik aluminiowy, 8 – wkład izolacyjny, 9 – przekładka termiczna, 10 – taśma filcowa, 11 – profil wzmacniający, 12 – listwa maskująca (wymiar w mm)

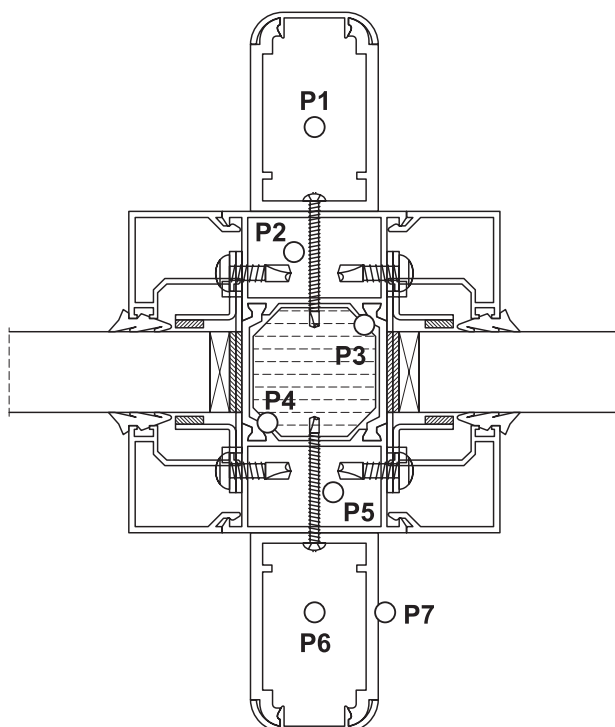


Rys. 28. Przekrój przez szyby zastosowane w badaniu

a) szyba typu A, b) szyba typu B; 1 – szyba ESG o grubości 5 mm, 2 – żel pęczniący, 3 – szyba TVG o grubości 4 mm, 4 – szyba ESG o grubości 3 mm, 5 – folia pęczniąca, 6 – szyba ESG o grubości 8 mm (wymiar w mm)



Rys. 29. Rozkład termoelementów oraz miejsca pomiarów deformacji na powierzchni elementów próbnych o wysokości 4477 mm



Rys. 30. Miejsca pomiaru temperatury wewnątrz profili P1–P6; punkt P7 dotyczy pomiaru na nienagrzewanej powierzchni profilu

Po wykonaniu ostatniego badania z elementu próbnego zostały wycięte fragmenty konstrukcji, które poddano badaniom mikroskopowym. Miejsca, z których wycięto próbki przedstawiono na rysunku 29 (oznaczone jako W1–W12).

Z elementów W1–W12 wycięto próbki o wymiarach około 1×2 cm. Następnie obserwowano ich mikrostrukturę. Zainkludowane próbki były szlifowane papierem ściernym i wypolerowane z wykorzystaniem zawiesiny diamentowej $3 \mu\text{m}$. Po odpowiednim przygotowaniu powierzchni zgłady były trawione elektrochemicznie odczynnikami Bakera przez około 4 minuty. Wytrawione zgłady obserwowano przy użyciu mikroskopu świetlnego z zastosowaniem światła spolaryzowanego.

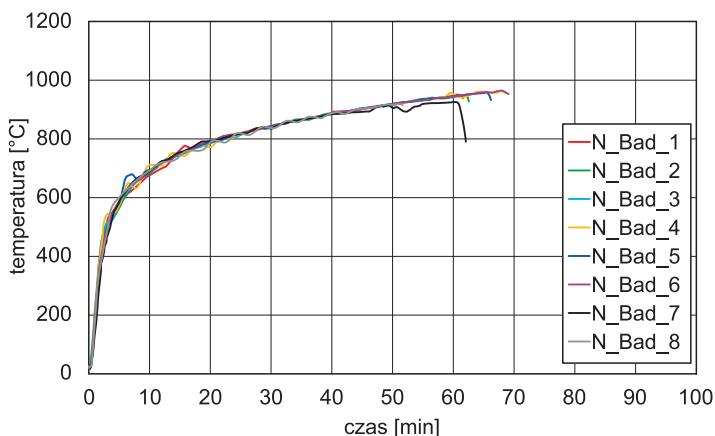
Na próbkach poddanych wcześniej obserwacjom mikroskopowym przeprowadzono także badania mikrotwardości. Wykonano je na wszystkich próbkach przy zastosowaniu obciążenia 500 g (HV 0.5), za pomocą mikrotwardościomierza typu Falcon 500.

Dla elementów oznaczonych jako W1–W12 przeprowadzono także obserwacje w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Obserwacje SEM wykonano przy użyciu mikroskopu typu Hitachi SU70, wyposażonego w detektor EDS (rentgenowska spektroskopia energodispersyjna) oraz YAG (detekcja elektronów wtórnych oraz wstecznie rozproszonych).

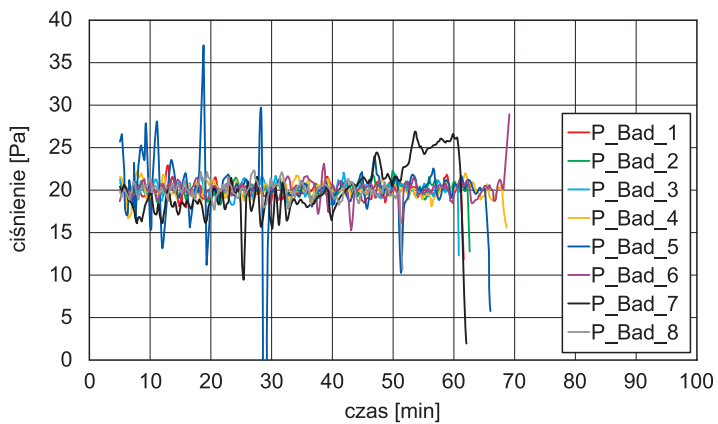
Przed wykonaniem badań SEM próbki oczyszczano przez 6 minut na przecinarce jonowej typu IM4000, a następnie wykonano ścieżki z kleju ze srebrem w celu uzyskania lepszych obrazów. Dla każdej z badanych próbek wykonano także pomiary EDS oraz sporządzono mapy składu chemicznego.

4.4. Warunki badania

Każdy z elementów próbnych nagrzewany był zgodnie ze standardową krzywą temperatura-czas (rys. 8). Wykresy nagrzewania elementów próbnych przedstawiono na rysunku 31. Ciśnienie w piecu w każdym badaniu utrzymywane było na poziomie 20 Pa wzdłuż górnej krawędzi elementu próbnego. Wykresy ciśnienia w trakcie danego badania przedstawiono na rysunku 32. Widoczne na rysunku 32 piki ciśnienia związane są z odpadaniem do komory pieca wewnętrznych warstw przeszklenia.



Rys. 31. Wykres średniej temperatury w komorze badawczej podczas nagrzewania elementów próbnych



Rys. 32. Wykres ciśnienia w piecu w trakcie badań

5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

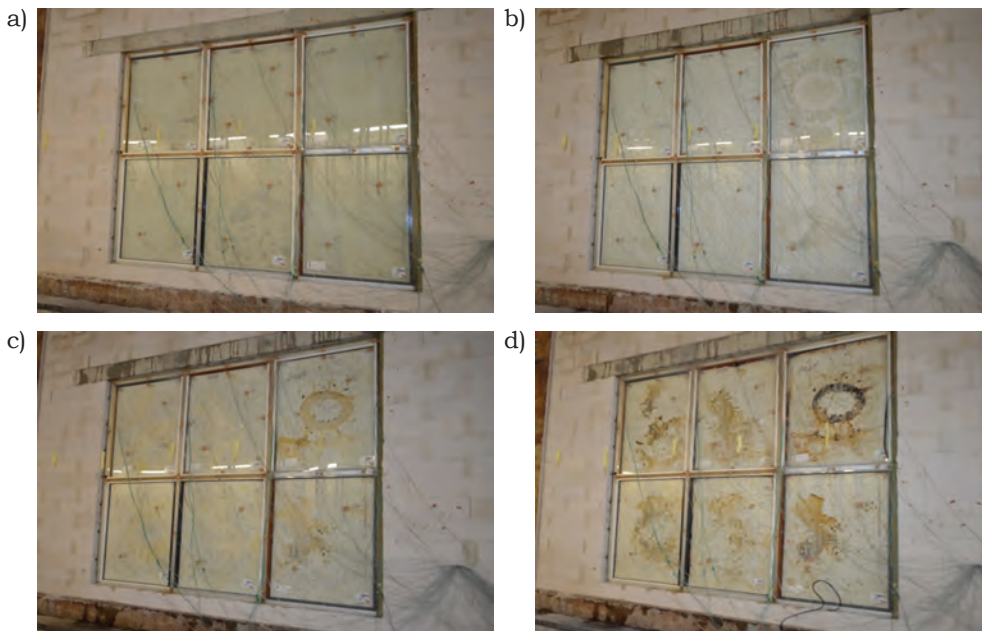
5.1. Szczelność i izolacyjność ogniowa oraz obserwacje w trakcie badania

Wyniki szczelności oraz izolacyjności ogniowej dla każdego z elementów próbnych przedstawiono w tablicy 6.

Tablica 6. Zestawienie wyników badań

Parametr	Wynik dla danego badania wyrażony jako czas w pełnych minutach od momentu rozpoczęcia badania do przekroczenia danego kryterium							
	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6	nr 7	nr 8
Szczelność ogniowa [min]	60	46	58	67	64	67	46	47
Płomień ciągły [min]	60	47	58	67	64	67	46	47
Szczelina 6 mm (na długości 150 mm) [min]	60	62	60	68	65	67	61	47
Szczelina 25 mm [min]	60	62	60	68	65	67	61	47
Zapalenie tamponu bawełnianego [min]	60	46	58	67	65	67	46	47
Izolacyjność ogniowa [min]	48	41	47	50	37	50	48	34
Przekroczenie temp. średniej [min]	53	45	52	50	38	51	48	34
Przekroczenie temp. maks. [min]	48	41	47	50	37	50	51	38
Przekroczenie temp. maks., szyby [min]	48	41	47	50	37	50	51	38
Przekroczenie temp. maks., profile [min]	61	54	60	65	61	67	54	49

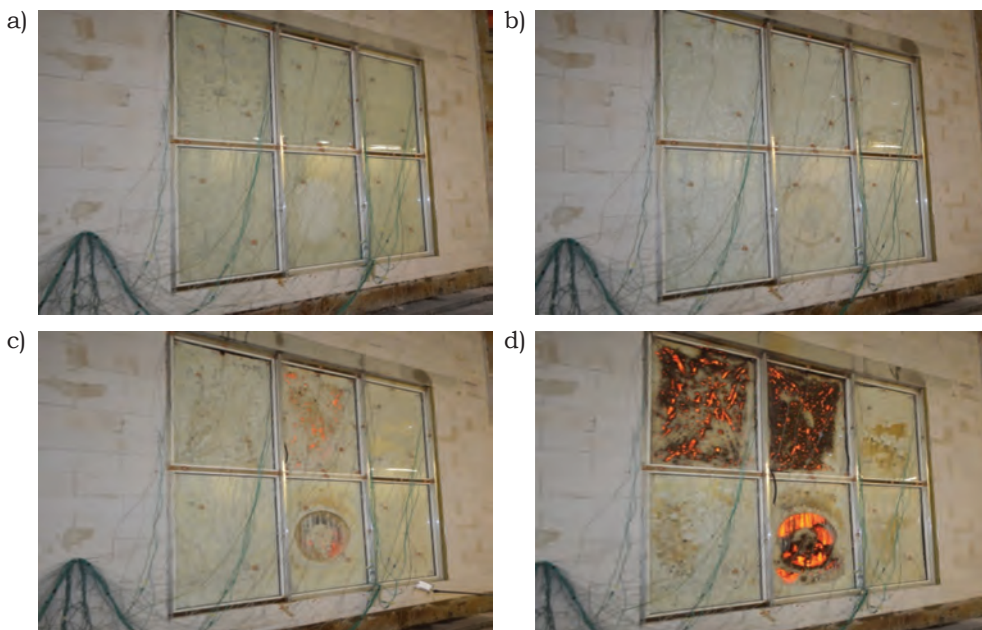
W badaniu elementu próbnego nr 1 utrata szczelności ogniowej nastąpiła w 61. minucie (zgodnie z tabl. 6 zachowana została przez 60 pełnych minut) z uwagi na pojawienie się płomienia ciągłego wzdłuż prawej pionowej krawędzi szyby nr G5. Ogień przedostał się na stronę nienagrzewaną przez szczelinę pomiędzy szybą G5 a profilem słupa M3 powstała w wyniku degradacji obu materiałów oraz znajdującej się pomiędzy nimi uszczelki pęczniającej. Izolacyjność ogniowa podczas badania elementu próbnego nr 1 utracona została w 49. minucie badania. Przyrost temperatury powyżej 180°C zarejestrowano w prawym dolnym narożu szyby nr G2 (termoelement nr 34). Przyrost średniej temperatury powyżej 140°C osiągnięty został w 54. minucie badania na szybie nr G6 (średnia z termoelementów nr 11 i 12). W przypadku profili przyrost temperatury powyżej 180°C na ich powierzchni osiągnięty został w ostatniej minucie badania, a spowodowany był nagrzewaniem węzła J7 (termoelement nr 52 na ryglu T3) poprzez gorące gazy wydostające się ze szczeliny pomiędzy szybą nr G5 i słupem M3. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 1 w trakcie badania przedstawiono na rysunku 33.



*Rys. 33. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 1
a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 48. minucie badania,
d) w 61. minucie badania*

W badaniu elementu próbnego nr 2 utratę szczelności ogniowej zarejestrowano najwcześniej spośród wszystkich badań wykonanych dla przeszklenia typu A. Szczelność ogniowa została przekroczona w 47. minucie z uwagi na zapalenie się tamponu bawełnianego w środku szerokości górnej krawędzi szyby nr G1. Około minutę po zapaleniu się tamponu bawełnianego w miejscu tym wystąpił płomień ciągły. Podobnie, jak w przypadku pierwszego elementu próbnego, utrata szczelności spowodowana była degradacją materiałów znajdujących się w miejscu połączenia szyby nr G1 oraz rygła T1. W przypadku tego badania należy zwrócić uwagę na zachowanie szyb, a dokładniej na wygląd części z nich w 61. minucie badania (rys. 34d), który odbiega od wyglądu pozostałych z przebadanych przeszkleń w tym samym czasie. Podobne zjawisko zaobserwowano także w przypadku dwóch szyb w elemencie próbnym nr 4 oraz jednej z szyb w badaniu elementu próbnego nr 5. Znacząca degradacja żeluz, w wyniku której szyby miały czarne zabarwienie z licznymi czerwonymi plamami, wskazywać może, że przeszklenia te miały ukryte wady ujawnione podczas badania. Zjawiska tego typu, które zdarzają się w badaniach w zakresie odporności ogniowej, opisane zostały w artykułach [111], [151]. Utrata izolacyjności ogniowej przez element próbny nr 2 nastąpiła w 42. minucie. Przyrost temperatury powyżej 180°C zarejestrowano 20 mm pod miejscem, w którym nastąpiła utrata szczelności ogniowej, w środku szerokości górnej krawędzi szyby nr G1 (termoelement nr 27). Temperatura średnia przekroczona została na szybie nr G2 w 46. minucie badania (średnia z termoelementów nr 3 i 4). Na rysunku 34d zauważyć można, że przeszklenie G2, podobnie jak G1, jest jednym z tych, dla których podejrzewane jest wystąpienie ukrytych wad materiałowych. Temperatura kryterialna na profilach aluminiowych przekroczona została w 55. minucie badania w węźle J2 pomiędzy szybami G1 i G2, na połączeniu rygła T2 ze słupem M2 (termoelement nr 18). Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 2 w trakcie badania przedstawiono na rysunku 34.

W badaniu elementu próbnego nr 3 kryterium szczelności ogniowej zostało osiągnięte w 59. minucie. Utrata szczelności nastąpiła z uwagi na zapalenie się tamponu bawełnianego w środku wysokości pionowej krawędzi szyby G2, na połączeniu ze słupem M2. Podobnie, jak w poprzednich przypadkach, pojawienie się szczeliny w tym miejscu związane było z utratą materiału spowodowaną jego wypaleniem. Przekroczenie izolacyjności ogniowej w badaniu trzeciego elementu próbnego nastąpiło w 48. minucie. Zarejestrowano przyrost temperatury powyżej 180°C w lewym dolnym narożu przeszklenia nr G2, w okolicy węzła J6 (termoelement nr 34). Dopuszczalny przyrost średniej temperatury na szybach przekroczony został w 53. minucie badania na szybie nr G2 (średnia z termoelementów nr 3 i 4).



*Rys. 34. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 2
a) w 15. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 46. minucie badania,
d) w 61. minucie badania*

Przekroczenie dopuszczalnej temperatury na profilach nastąpiło w 61. minucie badania. Co ciekawe doszło do tego w tym samym miejscu, co w przypadku badania elementu próbnego nr 2 – w węźle J2 pomiędzy szybami G1 i G2, na połączeniu rygla T2 ze słupem M2 (termoelement nr 18). Nienagrzewana powierzchnia elementu próbnego nr 3 w trakcie badania pokazana jest na rysunku 35.

W badaniu nr 4 element próbny zachował szczelność ogniową przez 67 minut. Przekroczenie kryterium nastąpiło z uwagi na pojawienie się płomienia ciągłego nad szybą G2. Podobnie, jak w poprzednich przypadkach, tak długie oddziaływanie pożaru standardowego spowodowało wypalenie materiałów w miejscu połączenia szyby G2 z rygłem T2. Izolacyjność ogniową w badaniu czwartego elementu próbnego przekroczona została w 51. minucie badania. Przyczyną utraty izolacyjności było przekroczenie średniej temperatury na szybie nr G7. W przypadku tego przeszklenia doszło do podobnego zjawiska, jak w badaniu nr 2, zbyt szybkie (w porównaniu do większości przeszkleń zastosowanych w badaniach) wypalenie się żeluz osłabiło izolacyjność ogniową szyby. W tym samym czasie nastąpiło przekroczenie dopuszczalnej temperatury maksymalnej na powierzchni przeszklenia G7 na termoelemencie nr 61

umieszczonym w dolnej części przeszklecia. W przypadku profili przyrost temperatury maksymalnej powyżej 180°C nastąpił w 66. minucie w środku szerokości rygla T4 (termoelement nr 47). Widok elementu próbnego nr 4 w trakcie badania przedstawiono na rysunku 36.



Rys. 35. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 3 a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 46. minucie badania, d) w 61. minucie badania



*Rys. 36. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 4
a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 48. minucie badania,
d) w 61. minucie badania*

W badaniu elementu próbnego nr 5 szczelność ogniowa została przekroczona w 65. minucie. Przyczyną utraty szczelności było pojawienie się ognia ciągłego w górnej części pionowej krawędzi szyby nr G1, na jej połączeniu ze słupem zamocowanym M1. W tym przypadku, oprócz degradacji materiału, wpływ na powstanie szczeliny, przez którą ogień przedostał się na drugą stronę, miała także różnica w deformacji pomiędzy słupem M1 i sąsiadującym z nim słupem M2. Izolacyjność ogniowa w przypadku piątego elementu próbnego zachowana została przez 37 minut. Powodem jej utraty było przekroczenie dopuszczalnego limitu dla przyrostu temperatury maksymalnej na szybie nr G6, w jej dolnej części (termoelement nr 12). Minutę później na tej samej szybie przekroczony został limit dopuszczalnego przyrostu temperatury średniej. Na rysunku 36 zauważyć można, że degradacja żeluzu w przypadku szyby G6 była zdecydowanie większa niż w przypadku pozostałych przeszkleń. Przyrost temperatury maksymalnej powyżej 180°C w przypadku profili osiągnięty został w 62. minucie badania. Temperatura została przekroczona w środku szerokości ryglu T1 (termoelement nr 15). Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 5 w trakcie badania przedstawiono na rysunku 37.

W badaniu elementu próbnego nr 6 szczelność ogniowa utracona została pod koniec 68. minuty badania. W tym przypadku zaobserwowano odmienny niż w pozostałych badaniach mechanizm zniszczenia elementu próbnego. Utrata szczelności nie była spowodowana przedzieraniem się płomienia przez małe szczeliny pomiędzy słupem a krawędzią szyby. Tym razem cała szyba (G5) wpadła do wnętrza pieca. Uszkodzenie górnej krawędzi przeszklecia było na tyle duże, że wysunęło się ono całkowicie ze stalowych kątowników mocujących. Izolacyjność ogniowa w przypadku elementu próbnego nr 6 została utracona w 51. minucie badania. Przekroczony został dopuszczalny przyrost temperatury maksymalnej w górnym narożu szyby G2, przy węźle J2 (termoelement nr 29). Minutę później przekroczony został dopuszczalny przyrost temperatury średniej na szybie G4 (średnie z termoelementów nr 7 i 8). Przyrost temperatury na profilach powyżej 180°C osiągnięty został w 68. minucie badania, w górnej części elementu próbnego na ryglu T10 w węźle J13 (termoelement nr 97). Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego w trakcie badania przedstawiono na rysunku 38.

W badaniu elementu próbnego nr 7 utrata szczelności ogniowej nastąpiła w 47. minucie w wyniku pojawienia się płomienia ciągłego nad szybą G3. Szyba wysunęła się ze swoich mocowań, tworząc szczelinę w środkowej części górnej krawędzi, pomiędzy szybą G3 a rygłem T3, przez którą wydostawały się płomienie w czasie dłuższym niż 10 sekund.



*Rys. 37. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 5
a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 46. minucie badania,
d) w 62. minucie badania*



*Rys. 38. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 6
a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania, c) w 46. minucie badania,
d) w 61. minucie badania*

W przypadku oceny izolacyjności ogniowej należy wziąć pod uwagę fakt, że w opisywanym badaniu nastąpiła duża deformacja słupa M4, co spowodowało powstanie szczeliny na krawędzi swobodnej próbki (rys. 39b-d). Z uwagi na wielkość oraz położenie szczeliny powstałej pomiędzy elementem próbnym a konstrukcją mocującą nie było możliwe jej uszczelnienie wełną mineralną w trakcie badania. Po powstaniu szczeliny gorące gazy wydostające się z pieca nagrzewały termoelementy znajdujące się na słupie M4; dlatego też zgodnie z wymaganiami normy [125] nie były one brane pod uwagę przy ocenie izolacyjności ogniowej. W praktyce szczelina tego typu nie mogłaby powstać, ponieważ słup M4 byłby zamocowany do konstrukcji mocującej. Przed wystąpieniem płomienia ciągłego żaden z termoelementów nie wskazywał temperatury wykraczającej poza graniczne przy ocenie izolacyjności ogniowej. Dlatego też, zgodnie z zasadami klasyfikacyjnymi, za moment utraty izolacyjności ogniowej należy uznać moment, w którym przegroda straciła szczelność. Przyrost temperatury powyżej temperatury granicznej zarejestrowany został po przekroczeniu szczelności ogniowej. W 49. minucie przekroczony został dopuszczalny przyrost średniej temperatury na szybie nr G3 (średnia z termoelementów nr 5 i 6). W 52. minucie przekroczony został dopuszczalny przyrost temperatury maksymalnej na szybie nr G3, w lewym górnym narożniku (termoelement nr 37). Dopuszczalna temperatura na profilach przekroczona została w 55. minucie, w środku szerokości rygla T12 (termoelement nr 116), trzy minuty po wystąpieniu przekroczenia w miejscu tym pojawił się płomień ciągły. Warto odnotowania jest to, że utrata zarówno szczelności, jak i izolacyjności ogniowej nastąpiła w okolicy miejsca o największej deformacji zarejestrowanej podczas badania.

W badaniu elementu próbnego nr 8 szczelność ogniowa została przekroczona w 48. minucie z uwagi na pojawienie się płomienia ciągłego pomiędzy szybą G1 a słupem M2. Przyczyny powstania szczeliny w tym miejscu były najprawdopodobniej takie same, jak w przypadku badania nr 5 – degradacja materiału połączona ze znaczną różnicą w wartości ugięcia sąsiadujących słupów. W przypadku izolacyjności ogniowej jej utrata nastąpiła z uwagi na przekroczenie dopuszczalnego średniego przyrostu temperatury na szybach. Temperatura przekroczona została w 35. minucie na szybie nr G6 (średnia z termoelementów nr 11 i 12). Dopuszczalna temperatura maksymalna przekroczona została w 39. minucie na szybie G2 w środku wysokości krawędzi graniczącej ze słupem M4 umieszczonym na krawędzi swobodnej (termoelement nr 33). W przypadku profili temperatura dopuszczalna przekroczona została w 50. minucie w środku wysokości słupa centralnego M3, bliżej krawędzi swobodnej (termoelement nr 42). Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego w trakcie badania przedstawiono na rysunku 40.

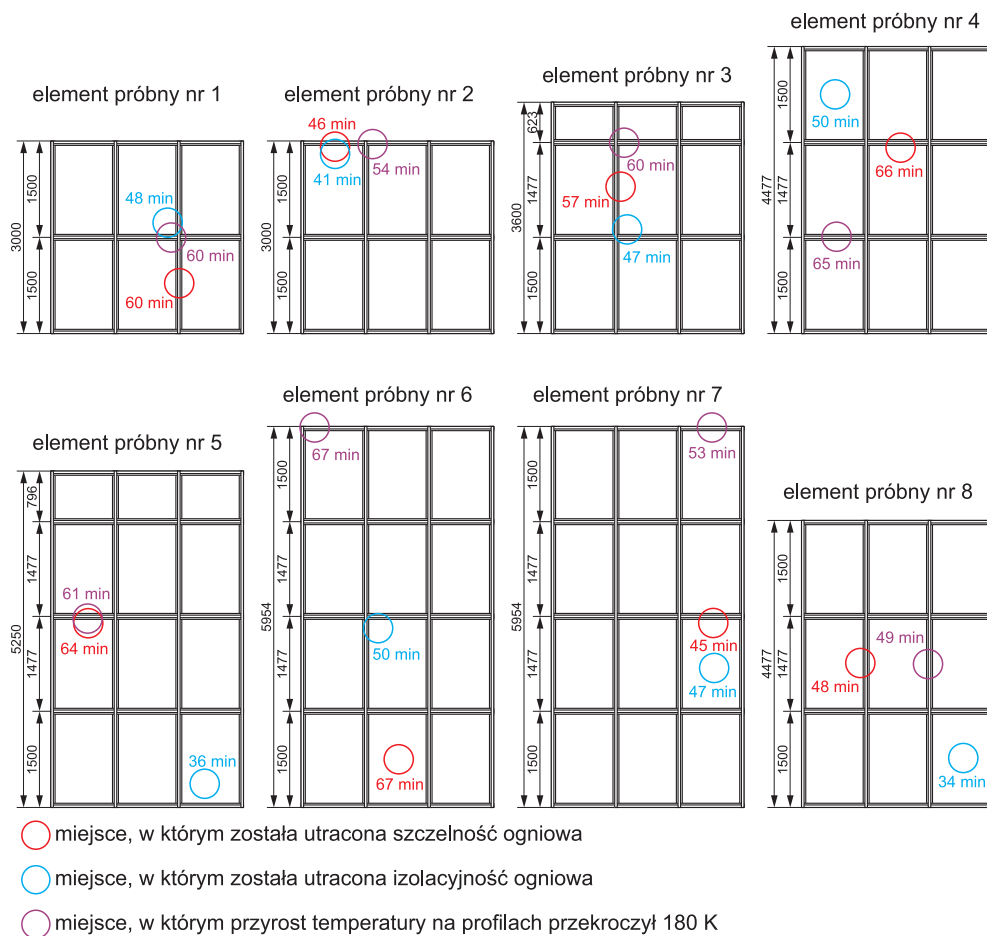


*Rys. 39. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 7
a) w 16. minucie badania, b) w 31. minucie badania,
c) w 46. minucie badania, d) w 61. minucie badania*



Rys. 40. Widok nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego nr 8
a) w 16. minucie badania, b) w 22. minucie badania,
c) w 31. minucie badania, d) w 51. minucie badania

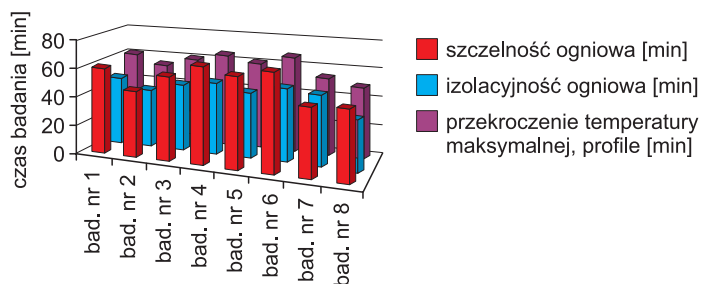
Miejsca, w których nastąpiło przekroczenie kryterium w danym badaniu zestawiono w tablicy 7. Na rysunku 41 zaznaczono miejsca, w których przekroczone zostało dane kryterium wraz z przedstawieniem czasu (w pełnych minutach, które upłynęły od początku badania), przez który były one zachowane. Widok próbki na rysunku 41 przedstawiony jest w taki sposób, że słup zamocowany (M1) znajduje się zawsze po lewej stronie. Na rysunku 42 przedstawiono wyniki zestawione w formie wykresu.



Rys. 41. Miejsca, w których przekroczone zostało dane kryterium oraz czas, przez który były one zachowane

Tablica 7. Zestawienie miejsc, w których nastąpiło przekroczenie

Parametr	Miejsce, w którym nastąpiło przekroczenie							
	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6	nr 7	nr 8
Szczelność ogniowa	G5/M3	G1/T1	G2/M2	G2/T2	G1/M1	G5	G3/T3	G1/M2
Izolacyjność ogniowa	G2	G1	G2	G7	G6	G2	G3	G6
Przekroczenie temp. średniej	G6	G2	G2	G7	G6	G4	G3	G6
Przekroczenie temp. maks.	G2	G1	G2	G7	G6	G2	G3	G2
Przekroczenie temp. maks., szyby	G2	G1	G2	G7	G6	G2	G3	G2
Przekroczenie temp. maks., profile	T3(J7)	T2(J2)	T2(J2)	T4	T1	T10(J13)	T12	M3

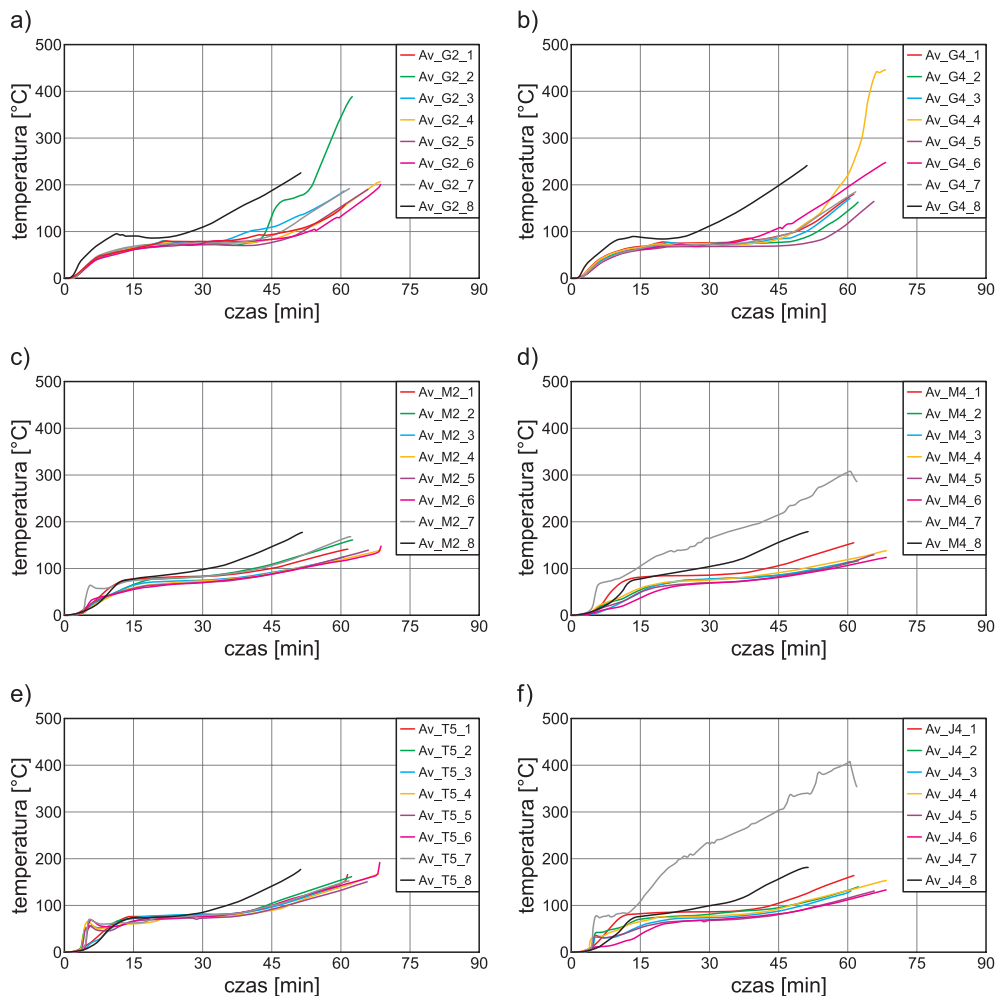


Rys. 42. Wyniki przeprowadzonych badań

5.2. Temperatura na nienagrzewanej powierzchni

Temperatura na nienagrzewanej powierzchni elementów próbnych mierzona była przy użyciu opisanych wcześniej termoelementów powierzchniowych, umieszczonych w charakterystycznych miejscach przeszklonych ścian działowych, takich jak szyby (oznaczone jako G1–G12), słupy (M1–M4), rygle (T1–T12) oraz połączenia słupów z ryglami, węzły (J1–J12). Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 29. Na rysunku 43 przedstawiono przykładowe porównanie średnich przyrostów temperatury

w charakterystycznych miejscach ścian. Wykresy dla każdego z miejsc pomiarowych znajdują się w rozprawie [1].



Rys. 43. Porównanie przyrostów średniej temperatury w zależności od elementu próbnego

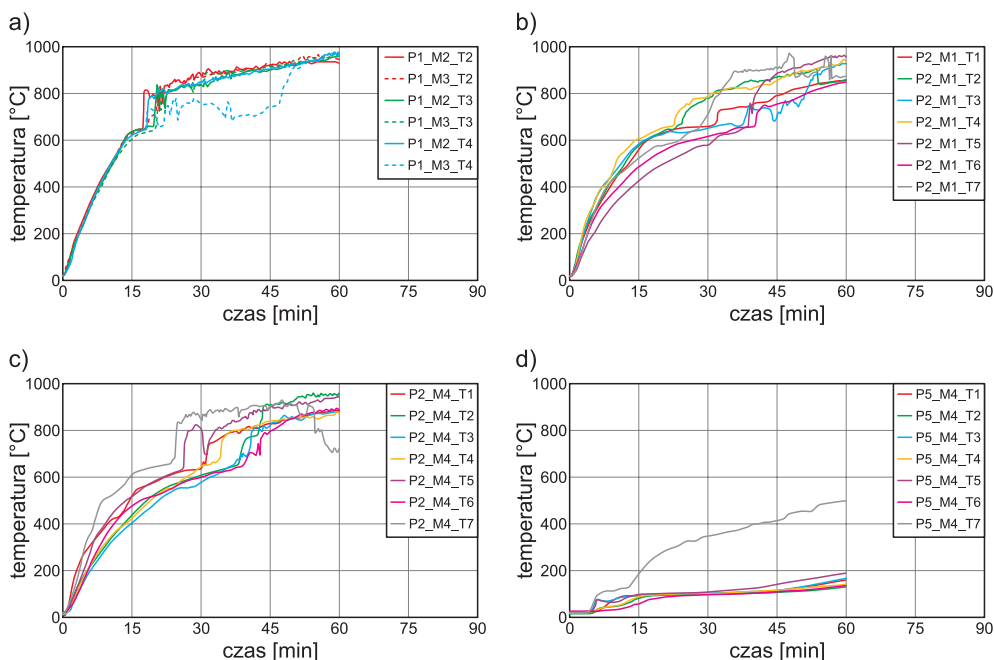
a) na przeszkleniu G2, b) na przeszkleniu G4, c) na słupie M2, d) na słupie M4, e) na ryglu T5, f) na połączeniu J4

Na przedstawionych wykresach (rys. 43) zauważyć można, że w przypadku badań elementów próbnych nr 1 do 7 zarejestrowane wartości przyrostów temperatury w danym miejscu pomiarowym są do siebie zbliżone do około

40. minuty badania. Wyjątek stanowią niektóre z miejsc pomiarowych na krawędzi swobodnej elementu próbnego nr 7. Wyższy od pozostałych przyrost temperatury zarejestrowany w tym miejscu związany był z rozszczelnieniem krawędzi swobodnej. Wartości przyrostów temperatury w badaniu elementu próbnego nr 8 wyraźnie różnią się od pozostałych. W przypadku pomiarów prowadzonych na przeszkleniach różnica widoczna jest przez cały czas trwania badania, natomiast w przypadku profili różnica zaczyna być wyraźnie widoczna od około 30. minuty badania.

5.3. Temperatura wewnątrz profili

Pomiary temperatury prowadzone były nie tylko na powierzchni elementu próbnego, lecz również we wnętrzu profili. Na rysunku 44 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatury wewnątrz profili, szczegółowe wykresy temperatury znajdują się w rozprawie [1].

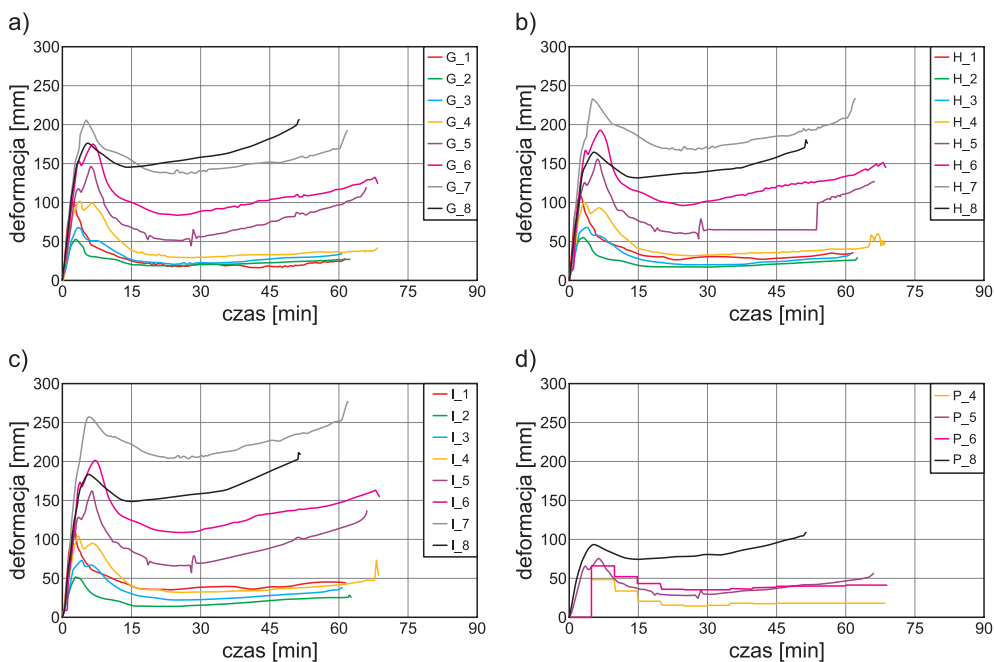


Rys. 44. Przyrosty temperatury w słupach
 a) punkt pomiarowy P1, słupy M2 i M3, b) punkt pomiarowy P2, słup M1,
 c) punkt pomiarowy P2, słup M4, d) punkt pomiarowy P5, słup M4

Zarówno w przypadku profili słupów skrajnych, jak i centralnych, zauważyć można, że dla wszystkich punktów pomiarowych (oprócz P2 i P3) różnice pomiędzy zarejestrowanymi temperaturami są niewielkie. Podobnie, jak w przypadku temperatury na powierzchni elementów próbnych, wyższe temperatury od pozostałych zarejestrowano w przypadku słupa na krawędzi swobodnej elementu próbnego nr 7 oraz słupów centralnych elementu próbnego nr 8. Dodatkowo wykresy temperatury wewnątrz profili wskazują na wytopienie się części aluminiowych profili znajdujących się po stronie nagrzewanej, w określonym czasie badania.

5.4. Deformacje

Zmierzone podczas badań deformacje elementów próbnych w przykładowych miejscach przedstawiono na rysunku 45. Wyniki pomiarów w pozostałych miejscach odnaleźć można w rozprawie [1].



Rys. 45. Deformacje elementów próbnych
a) punkt G, b) punkt H, c) punkt I, d) punkt P

Większość deformacji mierzona była czujnikami laserowymi lub linkowymi (pomiar co 15 sekund). W niektórych przypadkach, z uwagi na brak dostępności odpowiedniej liczby czujników, pomiar prowadzony był ręcznie przy użyciu miarki oraz linki stanowiącej odniesienie (pomiar co 5 minut). W ciągu pierwszych 36 minut badania (czas klasyfikacyjny dopuszczający powiększenie próbek o 20% w przypadku zachowania oczekiwanych kryteriów), w przypadku każdej ze ścianek największa deformacja rejestrowana była w geometrycznym środku elementu próbnego (punkt H) lub na słupie M3 (punkt I). Zestawienie maksymalnych ugięć poszczególnych słupów oraz geometrycznego środka elementów próbnych przedstawiono w tablicy 8.

Tablica 8. Maksymalne ugięcia słupów oraz geometrycznego środka elementu próbnego (do 36. minuty badania)

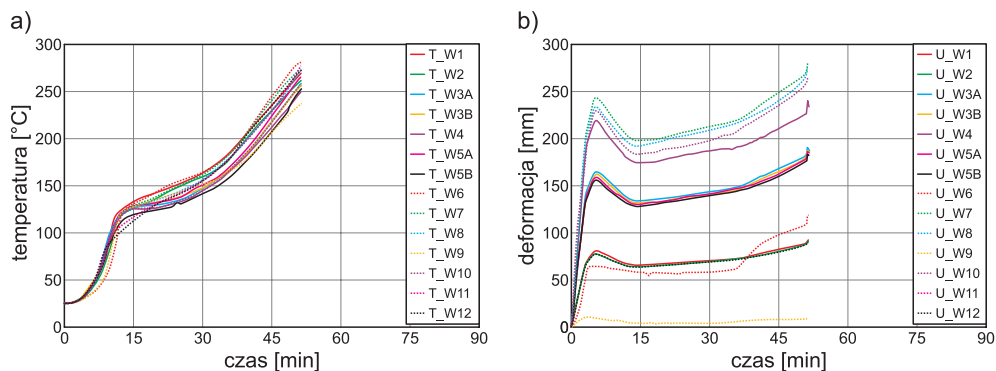
Element próbny nr	Maksymalne ugięcie [m]				
	środek próbki	słup M1	słup M2	słup M3	słup M4
1	0,11452	0,01396	0,10101	0,11238	0,04379
2	0,05554	0,00587	0,05249	0,05211	0,01259
3	0,06798	0,00732	0,06790	0,07317	0,01205
4	0,10043	0,00931	0,10185	0,10437	0,02818
5	0,15576	0,00896	0,14561	0,16259	0,04788
6	0,19293	0,01082	0,17493	0,20149	0,09346
7	0,23330	0,01361	0,20623	0,25806	0,21817
8	0,18048	0,00932	0,20626	0,21205	0,09033

W dalszej części monografii pod uwagę brane będą maksymalne wartości ugięcia dla słupa M3, a z tą wartością powiązana zostanie sztywność słupa.

5.5. Zmiany mikrostruktury

5.5.1. Wyniki badania odporności ogniowej

Na rysunku 46 przedstawiono temperaturę na nienagrzewanej powierzchni elementu próbnego oraz deformację elementu próbnego ściany nr 8 w danym miejsca wycięcia (rys. 29). Deformacja w punktach W1, W3A, W3B, W5A, W5B, W11 i W12 nie była mierzona i została oszacowana w przybliżeniu na podstawie dwóch sąsiadujących znanych wartości, pomiędzy którymi znajdowało się dane miejsce wycięcia.


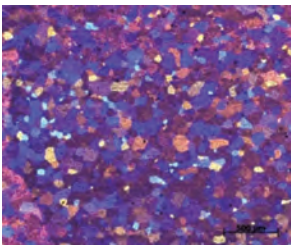
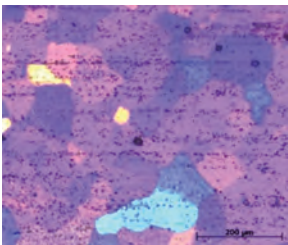



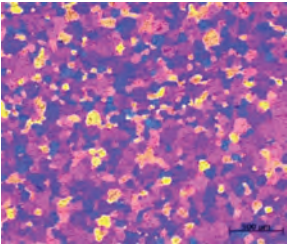
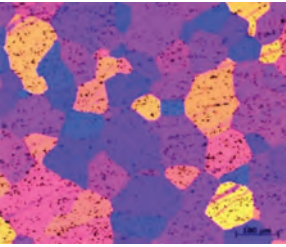
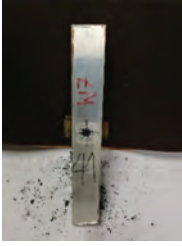
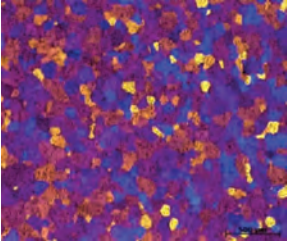
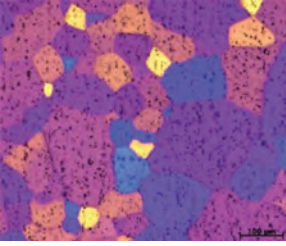

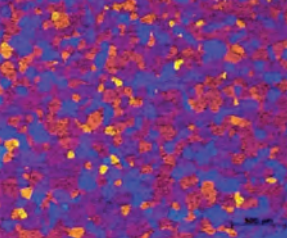
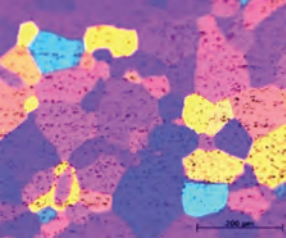
Rys. 46. Wyniki zarejestrowane w trakcie badania nr 8 w miejscach wycięcia
a) temperatura, b) deformacja

5.5.2. Obserwacje mikrostruktury

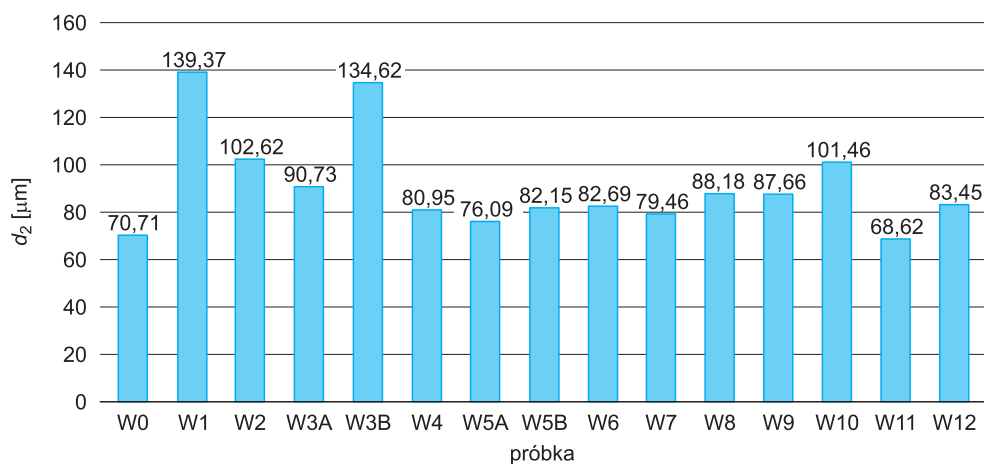
Wyniki obserwacji mikrostruktury przedstawiono w tabelicy 9 oraz na rysunku 47. W tabelicy zestawiono wyniki dla wybranych próbek, pozostałe odnaleźć można w rozprawie [1].

Tabela 9. Obrazy mikrostruktury obserwowanych próbek

Nazwa próbki / temp. maks. w badaniu / ugięcie maks. w badaniu ²⁾	Zdjęcie fragmentu, z którego wycięto element próbny	Powiększenie 5 razy	Powiększenie 20 razy
W0 / 23°C ¹⁾ / n.d.			

Nazwa próbki / temp. maks. w badaniu / ugięcie maks. w badaniu ²⁾	Zdjęcie fragmentu, z którego wycięto element próbny	Powiększenie 5 razy	Powiększenie 20 razy
W4 / 187,6°C / 180 mm			
W7 / 207,6°C / 212 mm			
W11 / 209,2°C / 71 mm			
<p>¹⁾ Element odniesienia, próbka W0, nie był częścią elementu poddanego badaniu w zakresie odporności ogniowej, stąd przyjęto temperaturę pokojową.</p> <p>²⁾ Ugięcie elementu próbnego w danym punkcie. W przypadku próbek W4 i W7 ugięcie zmierzono w danym punkcie w trakcie badania. W przypadku W11 podano wartość przybliżoną (obliczoną z proporcji na podstawie pomiarów ugięcia w dwóch punktach sąsiadujących).</p>			

Otrzymane obrazy mikrostruktury są typowe dla stopów aluminium. Oprócz występujących w materiale ziaren widoczne są przypadkowo rozmieszczone wydzielenia. W celu pełnej charakterystyki badanych próbek wykonano pomiary wielkości ziarna poprzez wyliczenie średniej wartości średnicy ekwiwalentnej (d_2). Jest ona definiowana jako średnica koła o powierzchni równej powierzchni analizowanego ziarna. Do analizy wybrano 100 przypadkowych ziaren. Na rysunku 47 zamieszczono wykres przedstawiający średnią wartość d_2 dla każdej z badanych próbek.

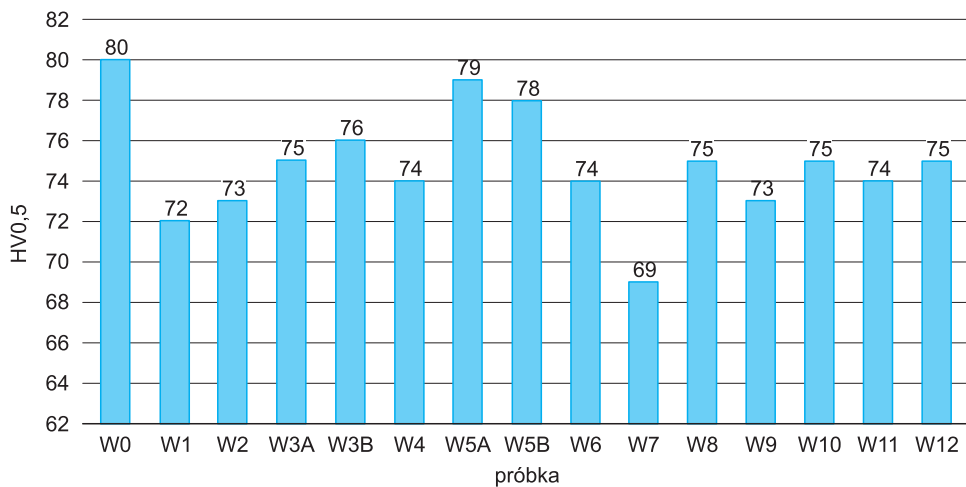


Rys. 47. Wykres średniej wartości ekwiwalentnej średnicy ziarna d_2

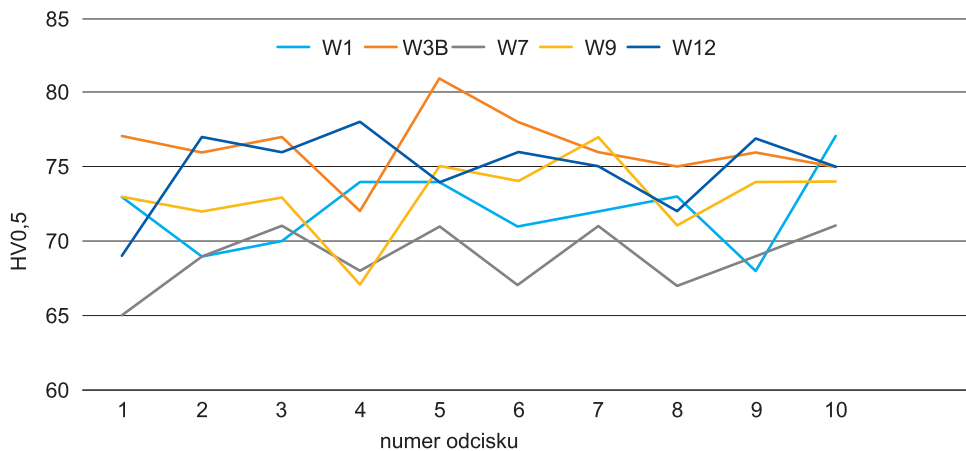
Wartość średniej ekwiwalentnej średnicy ziarna dla próbki niepoddanej oddziaływaniu wysokiej temperatury wynosiła 70,71 μm . W przypadku większości próbek wyciętych po badaniu odporności ogniowej wartość d_2 była wyższa. Ziarna o mniejszej średnicy zaobserwowano jedynie dla próbki W11. Najwyższa wartość średniej ekwiwalentnej średnicy ziarna zaobserwowana została w przypadku próbek W3B oraz W1 i wynosiła odpowiednio 134,62 μm oraz 139,37 μm .

5.5.3. Pomiary mikrotwardości

Średnie wartości mikrotwardości wyliczone dla 10 odcisków przedstawiono na rysunku 48. Podczas wykonywania pomiarów zauważono, że nie wszystkie próbki charakteryzują się jednorodnością mikrotwardości. W przypadku próbek W1, W3B, W7, W9 i W12 zaobserwowano istotne różnice pomiędzy wartością mikrotwardości uzyskaną dla poszczególnych odcisków (rys. 49).




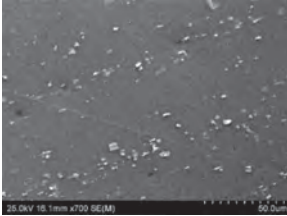
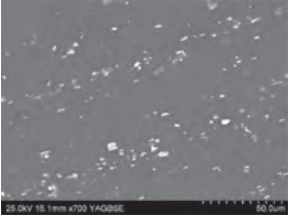

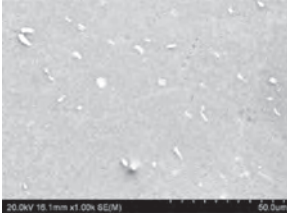
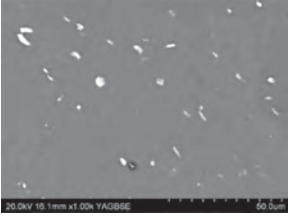
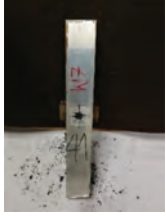
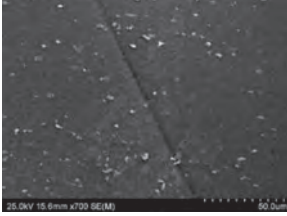
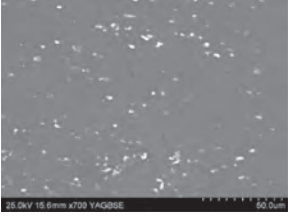

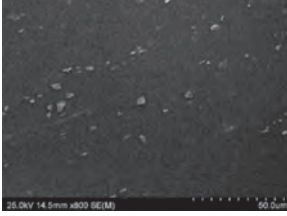
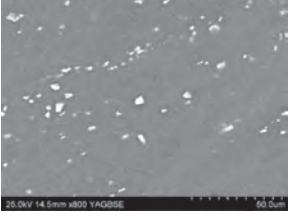
Rys. 48. Średnia wartość mikrotwardości w danym punkcie wycięcia



Rys. 49. Wartość mikrotwardości w przypadku próbek wykazujących niejednorodność mikrotwardości

Wszystkie próbki poddane oddziaływaniu wysokiej temperatury charakteryzowały się mniejszą mikrotwardością niż próbka W0. Najwyższą mikrotwardość wśród próbek wyciętych po badaniu odporności ogniowej zaobserwowano w przypadku elementów oznaczonych jako W5A oraz W5B. Najniższą mikrotwardością charakteryzowała się próbka W7 wycięta ze środka wysokości słupa M2.

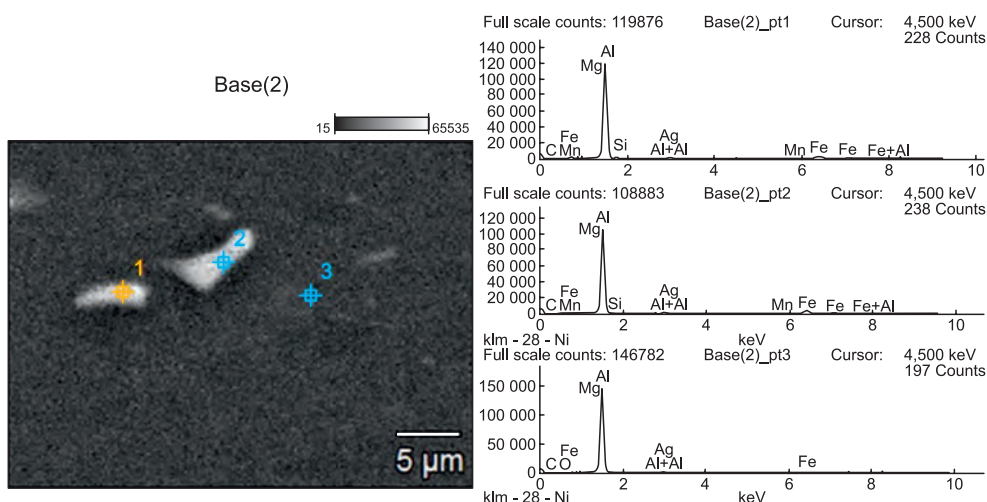
Tablica 10. Obrazy SEM / YAG SEM badanych próbek

Nazwa próbki / temp. maks. w badaniu / ugięcie maks. w badaniu ²⁾	Zdjęcie fragmentu, z którego wycięto element próbny	SEM	YAG SEM
W0 / 23°C ¹⁾ / n.d.			
W4 / 187,6°C / 180 mm			
W7 / 207,6°C / 212 mm			
W11 / 209,2°C / 71 mm			
<p>¹⁾ Element odniesienia, próbka W0, nie był częścią elementu poddanego badaniu w zakresie odporności ogniowej, stąd przyjęto temperaturę pokojową.</p> <p>²⁾ Ugięcie elementu próbnego w danym punkcie. W przypadku próbek W4 i W7 ugięcie zmierzono w danym punkcie w trakcie badania. W przypadku W11 podano wartość przybliżoną (obliczoną z proporcji na podstawie pomiarów ugięcia w dwóch punktach sąsiadujących).</p>			

5.5.4. Obserwacje w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM)

Obserwacje SEM wykonano na skaningowym mikroskopie elektronowym wyposażonym w detektor EDS oraz YAG. Dzięki zastosowaniu detektora YAG silny kontrast otrzymanych obrazów ujawnił różnice w masie obserwowanych obszarów (tabl. 10).

W wyniku obserwacji SEM ujawniono występowanie wydzieleni o różnej wielkości i kształcie. Badania EDS wykazały, że są to wydzielania zawierające Al, Fe, Si. W każdej z analizowanych próbek zauważono występowanie wydzieleni tego samego rodzaju, dlatego na rysunku 50 zamieszczono tylko przykładowe wyniki analizy (dla próbki W11).



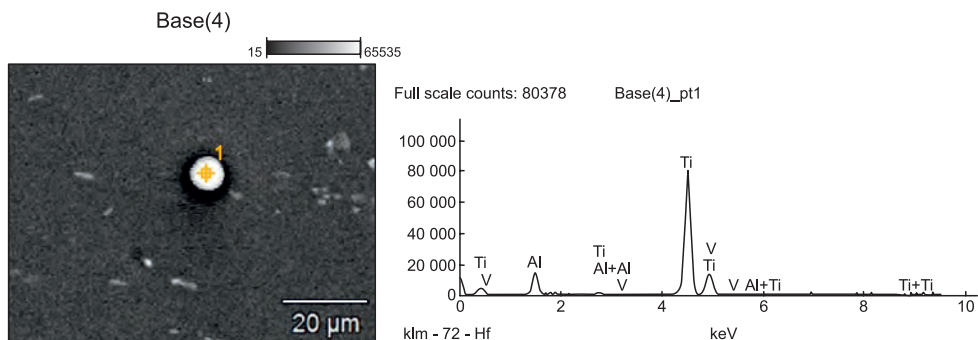
	% mas.						
	Al	Si	Mg	Fe	Ag	Mn	C
punkt 1	80,7	3,5	0,0	10,6	4,1	0,4	0,7
punkt 2	80,3	3,6	0,0	11,1	3,9	0,4	0,8
punkt 3	91,7	0,0	0,0	0,2	7,1	0,0	0,8

Rys. 50. Wyniki analizy EDS dla próbki W11

Jedynie w miejscu wycięcia próbki W7 znaleziono nietypowe, kuliste wydzielania zawierające tytan (rys. 51 i 52).

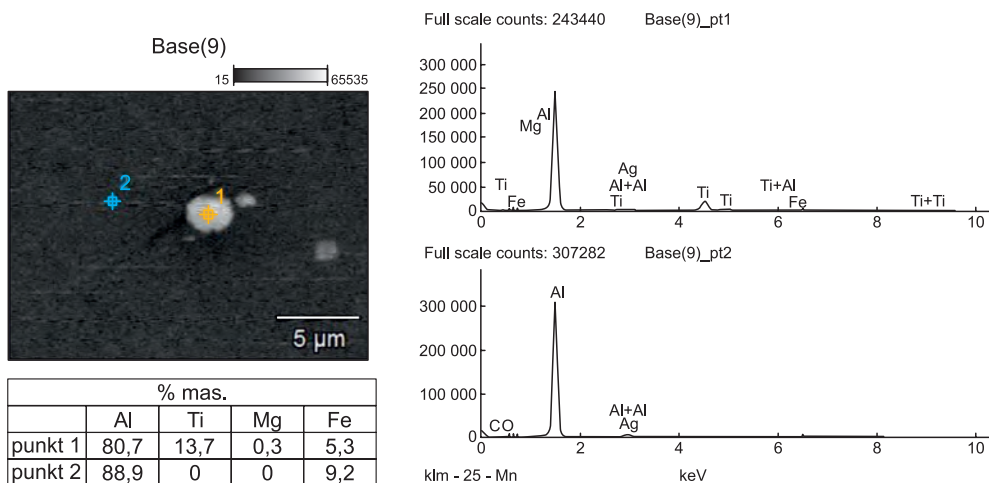
Dla każdej z próbek sporządzono mapy składu chemicznego. Wyniki dla wybranych próbek rozmieszczenia pierwiastków Al, Fe, C oraz O zestawiono w tablicy 11. W niektórych przypadkach, oprócz wymienionych wyżej

pierwiastków występujących w każdej z badanych próbek, zaobserwowano także duże ilości innych pierwiastków, co przedstawiono w tabelicy 12.



% mas.			
	Al	Ti	V
punkt 1	11,5	84,8	3,7

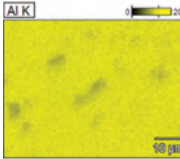
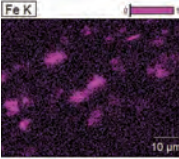
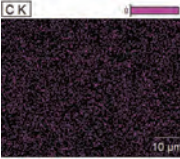
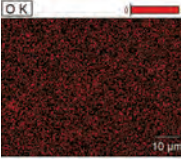
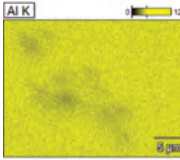
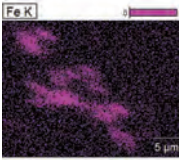
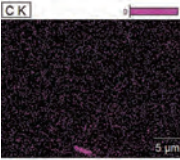


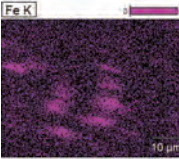
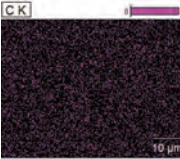

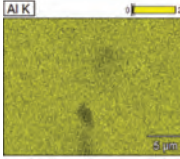
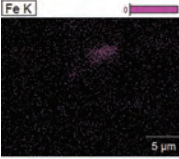
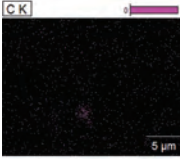
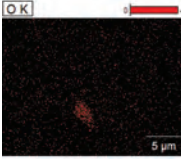
Rys. 51. Wyniki analizy EDS dla próbki W7




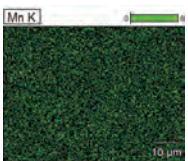
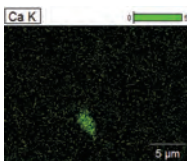
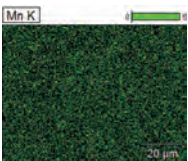
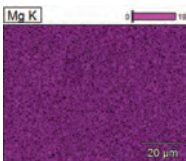
% mas.				
	Al	Ti	Mg	Fe
punkt 1	80,7	13,7	0,3	5,3
punkt 2	88,9	0	0	9,2

Rys. 52. Wyniki analizy EDS dla próbki W7

Tablica 11. Mapy składu chemicznego (Al, Fe, C, O)

Nazwa próbki / temp. maks. w badaniu / ugięcie maks. w badaniu ²⁾	Al	Fe	C	O
W0 / 23°C ¹⁾ / n.d.				
W4 / 187,6°C / 180 mm				
W7 / 207,6°C / 212 mm				
W11 / 209,2°C / 71 mm				
<p>¹⁾ Element odniesienia, próbka W0, nie był częścią elementu poddanego badaniu w zakresie odporności ogniowej, stąd przyjęto temperaturę pokojową.</p> <p>²⁾ Ugięcie elementu próbnego w danym punkcie. W przypadku próbek W4 i W7 ugięcie zmierzono w danym punkcie w trakcie badania. W przypadku W11 podano wartość przybliżoną (obliczoną z proporcji na podstawie pomiarów ugięcia w dwóch punktach sąsiadujących).</p>				

Tablica 12. Mapy składu chemicznego (Mn, Mg, Ca)

Nazwa próbki / temp. maks. w badaniu / ugięcie maks. w badaniu ²⁾	Mn	Mg	Ca
W0 / 23°C ¹⁾ / n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
W4 / 187,6°C / 180 mm		n.d.	n.d.
W7 / 207,6°C / 212 mm		n.d.	n.d.
W11 / 209,2°C / 71 mm	n.d.	n.d.	
W12 / 205,4°C / 69 mm			n.d.

¹⁾ Element odniesienia, próbka W0, nie był częścią elementu poddanego badaniu w zakresie odporności ogniowej, stąd przyjęto temperaturę pokojową.

²⁾ Ugięcie elementu próbnego w danym punkcie. W przypadku próbek W4 i W7 ugięcie zmierzono w danym punkcie w trakcie badania. W przypadku W11 podano wartość przybliżoną (obliczoną z proporcji na podstawie pomiarów ugięcia w dwóch punktach sąsiadujących).

5.6. Analiza wyników badań

Wszystkie z przebadanych konstrukcji osiągnęły deklarowaną klasę odporności ogniowej, tj. zachowały zarówno swoją szczelność, jak i izolacyjność ogniową w czasie nie krótszym niż 30 minut.

Kryterium szczelności ogniowej w przypadku szyby typu A oraz profili słupów z zastosowanym wzmocnieniem najszybciej przekroczone zostało w badaniu ściany o wysokości 3000 mm. Przy tym badaniu pod uwagę należy wziąć fakt, że połowa zastosowanych w konstrukcji przeszkleń zachowywała się w sposób zdecydowanie gorszy niż większość z poddanych badaniu, co w znaczący sposób osłabiło całą konstrukcję. Teoretycznie, zgodnie z założeniami zakresu zastosowania przedstawionego w normie badawczej [109], ściany te powinny zachować swoją szczelność i izolacyjność ogniową najdłużej ze wszystkich przebadanych próbek. Odporność ogniowa powinna natomiast spadać wraz ze wzrostem wysokości ściany. Najdłużej (przez 67 minut) szczelność ogniowa zachowana została dla ścian o wysokości 4477 mm oraz 5954 mm, co sugeruje, że ściany o większej wysokości mogą posiadać lepsze właściwości ogniowe.

Inaczej jest w przypadku ścian bez zastosowanych wzmocnień. Ściana o wysokości 3000 mm zachowała swoją szczelność ogniową przez 60 minut, natomiast ściana o wysokości 5954 mm przez 46 minut, zatem zgodnie z założeniami normy badawczej szczelność ogniowa ściany zmalała wraz ze wzrostem jej wysokości.

Ściana z szybami typu B o wysokości 4477 mm, w której również nie zastosowano wzmocnień słupów, zachowała swoją szczelność ogniową przez 47 minut, co daje, pomimo zastosowania innych przeszkleń, wynik wpisujący się pomiędzy uzyskany w przypadku elementu nr 1 (ściana o wysokości 3000 mm) oraz elementu nr 7 (ściana o wysokości 5954 mm) dla ścian bez zastosowanych wzmocnień. Zaznaczyć należy jednak, że wyniku tego nie można wiązać z pozostałymi dwoma, z uwagi na fakt, że ściana wykazała zupełnie inne właściwości, biorąc pod uwagę kryterium izolacyjności ogniowej.

W każdym z przeprowadzonych badań osiągnięcie kryterium izolacyjności ogniowej związane było z przekroczeniem dopuszczalnego przyrostu temperatury (średniej lub maksymalnej) na jednym z przeszkleń. W przypadku szyby typu A przekroczenie to następowało pomiędzy 37. a 50. minutą badania. Najwcześniej temperatura kryterialna osiągnięta została w badaniu ściany o wysokości 5250 mm, a najpóźniej w przypadku ściany o wysokości 5954 mm z zastosowanymi profilami wzmacniającymi. W przypadku szyby typu B izolacyjność ogniowa osiągnięta została w 34. minucie badania. Na wcześniejsze przekroczenie temperatury wpływ mieć mogła mniejsza grubość

zastosowanej tafli szklanej oraz mniejsza ilość materiału pęczniejącego tworzącego warstwę izolacyjną.

W związku z powyższym stwierdzić można, że wysokość elementu próbnego nie wpływa na jego izolacyjność ogniową. Wpływ na ten parametr w przypadku ścianek działowych ma w głównej mierze rodzaj zastosowanych przeszkleń oraz dokładność ich wykonania. Zauważyć można, że w przypadku szyb typu A temperatura kryterialna najwcześniej została osiągnięta dla przeszkleń, odnośnie do których istnieje podejrzenie wystąpienia ukrytych wad.

Analizując wykresy przyrostów temperatury zauważyć można także, że do 30. minuty badania, a w niektórych przypadkach nawet o wiele dłużej, wartości w danym miejscu pomiarowym (przeszklenie, słupy, rygle, węzły) szyb typu A są do siebie bardzo zbliżone. Wniosek ten wzmacnia tezę, że wysokość elementu próbnego przeszklonej ściany działowej nie ma wpływu na jej izolacyjność ogniową. Dodatkowo stwierdzić można, że zastosowanie innego rodzaju przeszklenia wpłynęło na przyrosty temperatury nie tylko tafli szklanych, ale również profili. Wyższa temperatura na profilach przy zastosowaniu szyby typu B spowodowana jest zapewne mniejszą grubością przeszklenia i wynikająca z tego większą powierzchnią profilu poddanego nagrzewaniu.

W przypadku wszystkich przebadanych ścian przekroczenie kryterium szczelności oraz izolacyjności ogniowej wystąpiło długo po deklarowanym czasie klasyfikacyjnym. Zgodnie z wymaganiami normy badawczej [109] dopuszczalne jest powiększenie wysokości ściany o 20%, jeżeli zachowała ona swoją szczelność i izolacyjność ogniową w czasie nie krótszym niż 36 minut. W związku z powyższym czas ten należy uznać za graniczny w przypadku rozważań związanych ze szczelnością i izolacyjnością ogniową. Zarówno aluminiowe profile z wypełnieniami, jak i przeszklenia ognioodporne projektowane są w taki sposób, aby wytrzymać oddziaływanie pożaru standardowego w takim właśnie czasie. Po tym okresie czas, przez który ściana zachowuje swoje właściwości ogniowe, związany jest w głównej mierze ze starannością wykonania wszystkich zastosowanych materiałów oraz całej konstrukcji. Na fotografiach zrobionych w okolicy 45. i 60. minuty badania zauważyć można, że pomimo zbliżonego oddziaływania pożaru (na co wskazują wykresy krzywej nagrzewania przedstawione na rys. 31) poziom zniszczenia poszczególnych elementów (szczególnie przeszkleń) jest różny i niezależny od wysokości przegrody.

Przekroczenie szczelności ogniowej w każdym przypadku związane było z degradacją materiałów składowych ściany wskutek długotrwałego oddziaływania pożaru standardowego. Stopnia degradacji materiałów składowych, jak również wynikającego stąd przekroczenia szczelności ogniowej, nie można w żaden sposób powiązać z wysokością ściany, jest on zależny tylko i wyłącznie

od zastosowanych materiałów oraz staranności wykonania konstrukcji. Wyniki badań wskazują zatem na to, że jeśli ściana o małej wysokości (3 m) zachowa swoją szczelność i izolacyjność ogniową w określonym czasie klasyfikacyjnym, to takiego samego zachowania oczekiwać należy od ścian wyższych, pod warunkiem że ściany te wykonane zostaną z tych samych materiałów i w taki sam sposób, maksymalny wymiar tafli szklanej nie będzie przekroczony, a słupy ściany zostaną w odpowiedni sposób wzmocnione, tak aby uniknąć jej zawalenia się w pierwszych minutach badania.

Analizując wykresy temperatury wewnątrz profili, zaobserwować można jak w czasie oddziaływania wysokiej temperatury ulegają one stopniowej degradacji. Stopy aluminium topią się przy temperaturze 600–650°C, a przy temperaturze 200–250°C konstrukcje z nich wykonane tracą około 50% swojej nośności [152]. Zauważyć można, że wewnętrzne kształtowniki profilu aluminiowego (związane z miejscem pomiaru P1 oraz P2) dosyć szybko przestają mieć jakiegokolwiek właściwości nośne, a cała konstrukcja opiera się tylko i wyłącznie na kształtownikach zewnętrznych. Temperatura powyżej 250°C, zarówno dla słupów skrajnych, jak i środkowych, osiągnięta zostaje pomiędzy 4. a 5. minutą badania. Około 18. minuty badania w przypadku słupów wewnętrznych (M2 i M3) oraz 30. minuty w przypadku słupa na krawędzi swobodnej (M4) temperatura wewnątrz komory utworzonej przez kształtownik wzmacniający (punkt pomiarowy P1) jest już na tyle zbliżona do temperatury wewnątrz pieca, że uznać można, iż kształtownik wzmacniający uległ całkowitemu wytopieniu. To samo dzieje się z zewnętrznym kształtownikiem profilu głównego (punkt pomiarowy P2) odpowiednio w 22. minucie dla słupów środkowych (M2 i M3) i 40. minucie w przypadku słupów skrajnych (M1 i M4).

Ciekawe zjawisko zaobserwowano w przypadku punktu pomiarowego P3. Temperatura w tym miejscu różni się znacznie. Tak duży rozrzut wartości może być związany z oddziaływaniem na termoparę procesów zachodzących we wkładzie izolacyjnym oraz w późniejszej fazie badania pęcznienia uszczelki umieszczonej po obwodzie szyb oraz wydzielania się z przeszkleń ogniochronnego żelu.

Temperatury zarejestrowane wewnątrz profili aluminiowych, podobnie do tych zarejestrowanych na zewnętrznej powierzchni profili (związanych z kryterium izolacyjności ogniowej), są niezależne od wysokości ściany.

Z temperaturą wewnątrz profili ściśle powiązane są deformacje elementu próbnego. Szczyt deformacji w początkowej fazie badania związany jest z efektem bimetalicznym. Efekt ten wyraźnie słabnie przed 10. minutą badania, a dodatkowo topnienie kształtowników aluminiowych po stronie nagrzewanej sprawia, że deformacja ulega zmniejszeniu. Następnie, z uwagi na degradację

materiałów oraz stopniową utratę właściwości nośnych profili zewnętrznych, deformacja ponownie wzrasta, jednakże już nie tak gwałtownie, jak w początkowej fazie badania. Przebieg wykresów deformacji jest dla wszystkich z przebadanych ścian zbliżony, różnią się one co do wartości, a różnica ta wynika ze sztywności poszczególnych ścianek.

Otrzymane obrazy mikrostruktury są typowe dla stopu aluminium typu EN-AW 6060 T66. Oprócz występujących w materiale ziaren widoczne są przypadkowo rozmieszczone wydzielienia. W przywołanym stopie główne dodatki stopowe to magnez i krzem, które tworzą różne typy wydzielen w wyniku obróbki cieplnej: przesycania i starzenia. Oprócz głównych pierwiastków stopowych Mg i Si, materiał ten odznacza się zwiększoną zawartością Fe. Ze względu na obecność żelaza, oprócz równowagowych cząstek Mg-Si, w materiale mogą występować również nierozpuszczalne cząstki pierwotne typu Fe-Al-Mg-Si. Wytrzymałość stopów Al-Mg-Si jest determinowana przez obecność poszczególnych wysegregowanych wydzielen fazy wtórnych Mg-Si. Ich powstawanie jest opisane w literaturze [185]–[187].

Analizując wyniki badań mikroskopowych, zauważyć można, że w profilach wyciętych z próbki poddanej badaniu odporności ogniowej (miejsca pomiarowe W1–W12) w większości przypadków zaobserwowano wyższą wartość średniej średnicy ekwiwalentnej ziaren niż w przypadku próbki niepoddanej badaniu (W0). Jedynie w miejscu pomiarowym oznaczonym jako W11 wymiar ten był zbliżony do próbki W0.

Nagrzewanie profili w trakcie badania odporności ogniowej wpłynęło także na ich mikrotwardość, która w każdej z próbek była niższa niż w przypadku próbki W0. Najmniejszą wartość mikrotwardości otrzymano dla próbki W7. Wartości tej nie można jednak powiązać ani z maksymalną temperaturą osiągniętą na profilu, ani z deformacją ściany w miejscu, z którego została pobrana próbka.

Analiza EDS dla badanych próbek wykazała obecność wydzielen zawierających Al, Fe, Si, a brak pików świadczących o obecności Mg na rysunkach 50–52 mógł być spowodowany jego niewielką ilością w badanych próbkach. Obecność Ag w otrzymanych wynikach EDS spowodowana jest zastosowaniem podczas preparatyki kleju zawierającego srebro.

Nietypowe wyniki dla stopu aluminium z serii 6xxx otrzymano dla próbki W7. Obecność wydzielen zawierających tytan mogła spowodować różnice w mikrotwardości dla tej próbki, która była zdecydowanie niższa niż w przypadku wszystkich pozostałych próbek.

Wyniki pierwszych sześciu badań omówione zostały w publikacji [183].

6. EFEKT SKALI W OCENIE ODPORNOŚCI OGNIOWEJ PIONOWYCH PRZEGRÓD PRZESZKLONYCH

6.1. Deformacja przegród w zależności od sztywności słupów

W przeprowadzonych badaniach we wszystkich przypadkach największa deformacja słupa zarejestrowana została w środku wysokości elementu oznaczonego jako M3, czyli środkowego słupa położonego bliżej krawędzi swobodnej. W każdym badaniu słup ten charakteryzował się inną sztywnością, co związane było z jego wysokością oraz zastosowaniem lub nie profili wzmacniających. Wartości sztywności słupa M3 w danym badaniu wraz z jego maksymalną deformacją, zgodnie z tablicą 8, przedstawiono w tablicy 13. Podana sztywność słupa obliczona została na podstawie wzoru (6.9). Stanowi ona obciążenie równomiernie rozłożone na całej wysokości słupa, o wartości wymaganej do wywołania jednostkowego przemieszczenia swobodnie podpartego słupa. W obliczeniach słup potraktowany został jako belka swobodnie podparta.

Tablica 13. Sztywność słupa M3 w danym badaniu oraz jego maksymalne ugięcie do 36. minuty badania

Element próbny nr	Wysokość elementu próbnego [m]	Zastosowanie profili wzmacniających	Sztywność słupa [N/m]	Maksymalne ugięcie zgodnie z tablicą 8 [m]
1	3,000	nie	48323,239	0,11238
2	3,000	tak	273820,630	0,05211
3	3,600	tak	132050,844	0,07317
4	4,477	tak	55208,101	0,10437
5	5,250	tak	29195,369	0,16259
6	5,954	tak	17648,828	0,20149
7	5,954	nie	3114,625	0,25806
8	4,477	nie	9742,999	0,21205

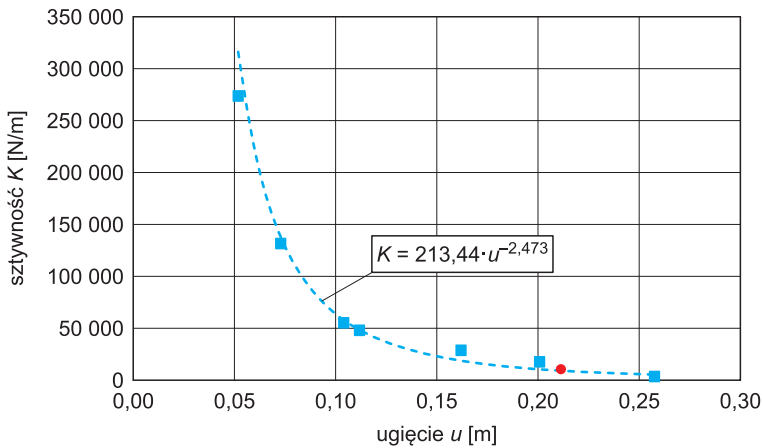
W przypadku ścian z zastosowanym przeszkleniem typu A zależność maksymalnego ugięcia od sztywności słupa danej ściany przedstawiona została przerywaną niebieską linią na rysunku 53 oraz opisana wzorem (6.1).

$$K = 213,44 u^{-2,473} \quad (6.1)$$

gdzie:

K – sztywność słupa [N/m],

u – maksymalne ugięcie słupa [m].



Rys. 53. Ugięcia elementów próbnych ścian z przeszkleniem typu A (niebieski znacznik) oraz typu B (czerwony znacznik) w zależności od sztywności słupa w danym badaniu

Biorąc pod uwagę wyniki badania dla szyby typu B zauważyć można, że są one bardzo zbliżone do krzywej wyznaczonej zgodnie z równaniem (6.1).

6.2. Obliczenie minimalnej sztywności słupa dla danej ściany

Na podstawie przeprowadzonych badań sztywność przeszklonych ścian działowych określić można następującym wzorem (6.2):

$$K = 213,44 u^{-2,473} + c \quad (6.2)$$

gdzie c wyznaczone jest na podstawie badań elementu o wymiarach minimalnych (3 × 3 m zgodnie z przyjętą procedurą) i opisane wzorem (6.3):

$$c = K_b - 213,44 u_b^{-2,473} \quad (6.3)$$

gdzie:

K_b – sztywność słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [N/m],
 u_b – ugięcie maksymalne słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [m].

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań oraz wzorów (6.1)–(6.3) wyznaczyć można minimalną sztywność słupa, dla której ściana powinna zachować swoją odporność ogniową (pod warunkiem, że ściana o minimalnych wymiarach osiągnęła w badaniu odpowiednią klasę odporności ogniowej):

$$K_{\min.} = 213,44 u_{\max.}^{-2,473} + c \quad (6.4)$$

gdzie:

$K_{\min.}$ – minimalna sztywność słupa ściany, dla której zachowana zostanie klasa odporności ogniowej [N/m],
 $u_{\max.}$ – przewidywane maksymalne ugięcie ściany o minimalnej sztywności [m].

Znając ugięcie maksymalne słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach (u_b) oraz bazując na wynikach badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, wyznaczyć można przewidywane maksymalne ugięcie ściany o minimalnej sztywności.

Zakładając, że aluminiowe przeszklone ściany działowe z zastosowanymi innymi przeszklzeniami lub z innym profilem o podobnej budowie (profile trzykomorowe z przekładką termiczną z zaizolowaną środkową komorą), będą uginać się w taki sam lub zbliżony sposób jak te, które poddane zostały badaniom, przyjąć można, że stosunek ugięcia ściany o maksymalnych wymiarach do ugięcia ściany o wymiarach minimalnych będzie taki sam. Przewidywane maksymalne ugięcie ściany przy minimalnej sztywności słupa będzie zatem powiększone w taki sam sposób, jak zwiększyło się ugięcie słupa M3 ściany z badania nr 7 (ściana o wysokości 5954 mm, profile bez wzmocnień), wynoszące 0,25806 m, względem ugięcia słupa M3 w badaniu nr 1 (ściana o wysokości 3000 mm, profile bez wzmocnień), wynoszącego 0,11238 m.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia, przewidywane ugięcie maksymalne dla minimalnej sztywności słupa wynosić będzie:

$$u_{\max.} = \frac{0,25806}{0,11238} u_b \quad (6.5)$$

czyli:

$$u_{\text{maks.}} = 2,296316 u_b \quad (6.6)$$

Podstawiając zależność (6.6) oraz zależność (6.3) do równania określającego sztywność minimalną (6.4), otrzymujemy:

$$K_{\text{min.}} = 213,44 (2,296316 u_b)^{-2,473} + K_b - 213,44 u_b^{-2,473} \quad (6.7)$$

czyli:

$$K_{\text{min.}} = K_b - 186,122 u_b^{-2,473} \quad (6.8)$$

6.3. Obliczenie dopuszczalnej maksymalnej wysokości ścian oraz minimalnego momentu bezwładności przekroju słupa ściany

Na podstawie równania (6.8) możliwe jest wyznaczenie maksymalnej dopuszczalnej wysokości ścian dla słupa o określonych wymiarach przekroju (i momencie bezwładności) oraz wyznaczenie wymaganego przekroju słupa wyrażonego jego momentem bezwładności dla danej wysokości ściany. Sztywność danego słupa przedstawiona w tablicy 13 została wyznaczona ze wzoru (6.9):

$$K = \frac{384}{5} \frac{E J f}{H^4} \quad (6.9)$$

gdzie:

E – moduł Younga; dla aluminium = $69,5 \times 10^9$ [Pa],

J – moment bezwładności przekroju danego słupa [m^4],

f – ugięcie wynoszące 1 [m],

H – wysokość danego słupa [m].

Podstawiając do wzoru (6.9) wartości znane, otrzymujemy:

$$K = 5,3376 \cdot 10^{12} \frac{J}{H^4} \quad (6.10)$$

Porównując wyznaczoną wartość (6.10) z równaniem (6.8), otrzymujemy:

$$K_b - 186,122 u_b^{-2,473} = 5,3376 \cdot 10^{12} \frac{J}{H^4} \quad (6.11)$$

Z równania (6.11) możliwe jest wyznaczenie maksymalnej dopuszczalnej wysokości ścian dla słupa o określonym momencie bezwładności (6.12) oraz

określenie wymaganego minimalnego momentu bezwładności słupa dla danej wysokości ściany (6.13). Korzystając z wzoru (6.12), obliczyć można maksymalną dopuszczalną wysokość ściany wykonanej przy użyciu profili o takim samym przekroju, jak te zastosowane w badaniu próbki o wysokości 3 m. Wzór (6.13) pozwala na dobranie odpowiednich profili wzmacniających w celu uzyskania dowolnej wysokości ściany

$$H_{\text{maks.}} = \sqrt[4]{\frac{5,3376 \cdot 10^{12} J_s}{K_b - 186,122 u_b^{-2,473}}} \quad (6.12)$$

gdzie J_s to moment bezwładności przekroju słupa, dla którego określana jest wysokość maksymalna [m^4],

$$J_{\text{min.}} = \frac{(K_b - 186,122 u_b^{-2,473}) H_s^4}{5,3376 \cdot 10^{12}} \quad (6.13)$$

gdzie H_s to wysokość ściany, dla której określony jest minimalny moment bezwładności przekroju słupa [m].

6.4. Współczynnik wyrażający efekt skali w ocenie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych

Na podstawie wzoru (6.12) możliwe jest wyznaczenie współczynnika wyrażającego efekt skali w ocenie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych. Współczynnik ten określa stosunek maksymalnej dopuszczalnej wysokości ściany do wysokości ściany zbadanej, czyli:

$$b_s = \frac{H_{\text{maks.}}}{H_b} \quad (6.14)$$

gdzie:

b_s – współczynnik wyrażający efekt skali,

$H_{\text{maks.}}$ – maksymalna dopuszczalna wysokość ściany dla słupa o określonym momencie bezwładności (słupa ściany poddanej badaniu), zgodna ze wzorem (6.12) [m],

H_b – wysokość próbki badanej w zakresie odporności ogniowej [m].

Zgodnie z przyjętymi założeniami wysokość próbki poddanej badaniu w zakresie odporności ogniowej (H_s) wynosi 3 m. Wartość maksymalnej

dopuszczalnej wysokości ściany dla słupa o określonym momencie bezwładności określona jest wzorem (6.12). Podstawienie wartości znanych do wzoru (6.13) umożliwia obliczenie współczynnika wyrażającego efekt skali w ocenie odporności ogniowej:

$$b_s = \sqrt[4]{\frac{65,9 \cdot 10^9 J_b}{K_b - 186,122 u_b^{-2,473}}} \quad (6.15)$$

gdzie:

J_b – moment bezwładności przekroju słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [m⁴],

K_b – sztywność słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [N/m],

u_b – ugięcie maksymalne słupa zbadanej ścianki o minimalnych wymiarach [m].

6.5. Algorytm postępowania przy określaniu odporności ogniowej ściany przeszklonej o założonej wysokości

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań oraz wzorów wyprowadzonych w rozdziale 6.3 opracowano algorytm postępowania przy ocenie odporności ogniowej aluminiowych przeszklonych ścian działowych o określonej wysokości, przedstawiony na rysunku 54.

W celu przybliżenia sposobu działania algorytmu zaprezentowanego na rysunku 54 poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy. Założono w nim, że wymagana wysokość przeszklonej ściany działowej to:

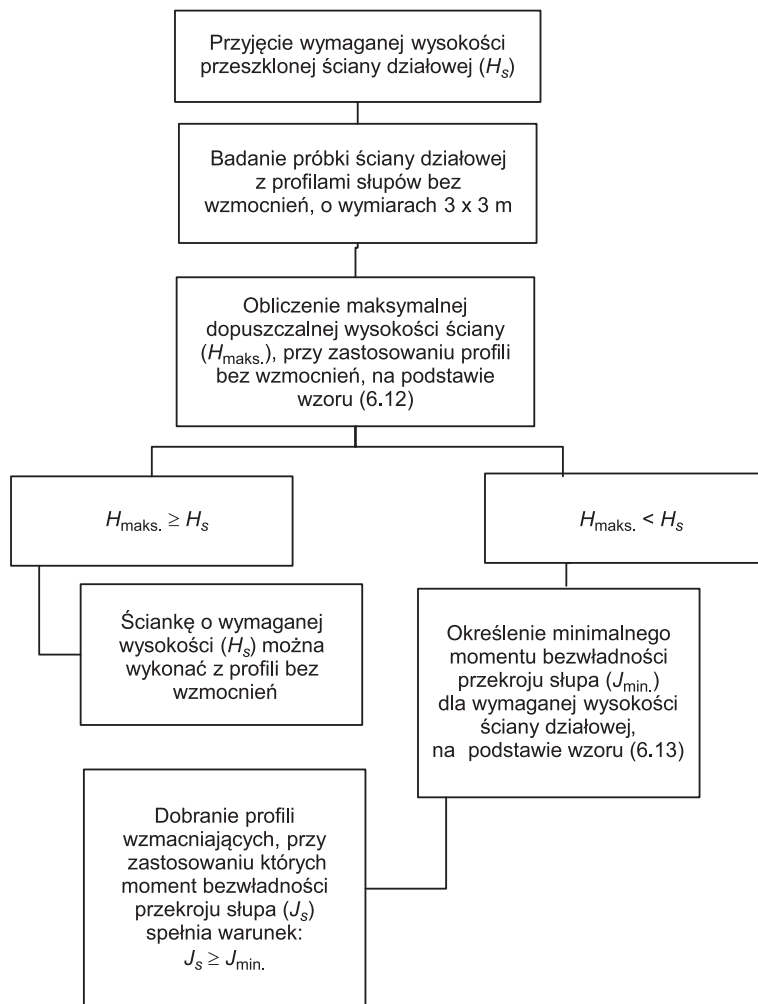
$$H_s = 8 \text{ [m]}$$

Przykładowa ściana w wersji bez wzmocnień wykonana jest z profili aluminiowych, dla których moment bezwładności przekroju poprzecznego wynosi:

$$J_s = 6,5 \times 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$$

Zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 54 w przykładzie założono, że wykonano badanie próbki o wymiarach 3 × 3 m, podczas którego oczekiwane kryteria odporności ogniowej nie zostały przekroczone. Maksymalne ugięcie słupa podczas badania wynosiło:

$$u_b = 0,125 \text{ [m]}$$



Rys. 54. Algorytm postępowania przy ocenie odporności ogniowej aluminiowych przeszklonych ścian działowych o określonej wysokości

Znając moment bezwładności przekroju słupa oraz jego wysokość, można wyznaczyć jego sztywność, która w tym przypadku wynosić będzie w przybliżeniu:

$$K_b = 4,3 \times 10^4 \text{ [N/m]}$$

Podstawiając wymienione powyżej dane do wzoru (6.12), otrzymujemy wartość maksymalnej wysokości ściany, jaką wykonać można przy użyciu profili przebadanych w 3 m próbce. Wynosi ona w omawianym przypadku:

$$H_{\text{maks.}} = 4,216 \text{ [m]}$$

Oznacza to, że:

$$H_{\text{maks.}} < H_s$$

a co za tym idzie, należy określić minimalny moment bezwładności przekroju słupa dla wymaganej wysokości ściany działowej (8 m), korzystając ze wzoru (6.13). Podstawiając dane określone w przykładzie, otrzymujemy:

$$J_{\text{min.}} = 8,4 \times 10^{-6} \text{ [m}^4\text{]}$$

Na podstawie podanej wyżej wartości możliwe jest dobranie odpowiednich profili, za pomocą których należy wzmocnić słupy ścianki o wysokości 8 m, tak aby zachowała ona określoną klasę odporności ogniowej.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeszkłone ściany działowe o określonej klasie odporności ogniowej pełnią istotną rolę w spełnianiu wymagań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego nowoczesnych obiektów budowlanych. Wyznaczenie rzeczywistej klasy szczelności i izolacyjności ogniowej szklanych przegród można uzyskać wyłącznie na drodze badawczej, spełniając wymagania normowe. Badanie odporności ogniowej pozwala na ocenę zachowania próbnego elementu konstrukcji budowlanej poddanego określonym warunkom nagrzewania i ciśnienia. W oparciu o ustalone kryteria możliwa jest ilościowa ocena odporności elementu na oddziaływanie wysokiej temperatury. Procedury badawcze z zakresu odporności ogniowej ścian działowych stosowane w Europie określają minimalne wymiary elementów próbnych, na których przeprowadzić należy badanie. Badania elementów próbnych o minimalnych wymiarach pozwalają na ocenę odporności ogniowej elementów o nieznacznie większych wymiarach. Nie rozwiązuje to jednak realnego problemu stosowania odpornych ogniowo przeszklonych oddzieleni o wysokości znacznie przewyższającej wymiary ścian zweryfikowanych badawczo. Oznacza to, że w wielu obiektach stosowane są rozwiązania, których skuteczność ochrony przed działaniem ognia nie została potwierdzona w badaniach. Celem niniejszej monografii było opracowanie algorytmu umożliwiającego, na podstawie badań elementów próbnych o wysokości 3 m, ocenę odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych wykonanych z profili aluminiowych o wysokości przekraczającej powyższy wymiar.

Analiza dostępnej literatury oraz raportów z badań nie dostarczyła wystarczających informacji do rozwiązania postawionego w pracy problemu naukowego. w związku z czym niezbędne było przeprowadzenie dodatkowych badań w zakresie odporności ogniowej. Do celów monografii przeprowadzono 8 badań w zakresie odporności ogniowej ośmiu przeszklonych ścian działowych o wysokości od 3,0 do 6,0 m. Dla jednego z elementów próbnych wykonano dodatkowo badania mikroskopowe fragmentów profili słupów oraz rygli wyciętych po badaniu ogniowym. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na opracowanie algorytmu umożliwiającego uwzględnienie efektu skali w ocenie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych.

Jako rozwiązanie problemu naukowego postawionego w monografii proponowano algorytm przedstawiony w rozdziale 6. Na podstawie równań (6.12) i (6.13) oraz wyników badania próbki o minimalnych wymiarach, określonych

w przyjętej procedurze badawczej, możliwe jest oszacowanie maksymalnej wysokości przeszklonej ściany aluminiowej dla danego przekroju aluminiowego profilu, jak również minimalnego wymaganego momentu bezwładności przekroju profilu, dla którego ścianka o danej wysokości zachowa swoją odporność ogniową. Na podstawie wymaganego minimalnego momentu bezwładności przekroju profilu aluminiowego możliwe jest natomiast dobranie odpowiednich profili wzmacniających.

Zaznaczyć należy, że wzory przedstawione w rozdziale 6 mają określony zakres zastosowania. Odnoszą się do aluminiowych profili trzykomorowych o symetrycznym przekroju, które wykonane są z dwóch kształtowników aluminiowych połączonych przekładką termiczną z poliamidu zbrojonego włóknem szklanym, mających zaizolowaną jedynie środkową komorę. Rozwiązania tego typu są charakterystyczne dla przeszklonych ścian działowych o klasie odporności ogniowej EI 15 oraz EI 30. Ponadto wzory odnoszą się do ścian, w których przeszklenia w danym rzędzie mają jednakową wysokość, która nie przekracza wysokości przeszklenia zbadanego w przypadku elementu próbnego o minimalnych wymiarach wymaganych przez normę badawczą [109].

Przedstawione w rozdziale 6 wzory mogłyby zostać wprowadzone jako podstawa zwiększania wysokości ścian w normie dotyczącej rozszerzonego zastosowania wyników badań przeszklonych ścian działowych [135]. W takiej sytuacji należałoby je jednak zmodyfikować o odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa. Analizując wykres przedstawiony na rysunku 53 zauważyć można, że część wyników znajduje się z prawej strony wykresu opisanego równaniem (6.1), a co za tym idzie wyznaczona sztywność dla danego ugięcia jest mniejsza od tej, dla której dane ugięcie zostało osiągnięte w badaniu. Bezpiecznym w takim przypadku jest przesunięcie wykresu w taki sposób, aby wszystkie wyniki ugięcia dla danej sztywności znajdowały się bezpośrednio na nim lub po jego lewej stronie. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przemnożenie równania (6.1) przez współczynnik 1,6 doprowadzi do tego, że wszystkie wyniki osiągnięte podczas badań znajdą się po „bezpiecznej” stronie krzywej. Operacja ta sprawi, że wszystkie z wyznaczonych w rozdziale 6 równań zmienią się w odpowiedni sposób, co w ostateczności doprowadzi do zmniejszenia dopuszczalnej maksymalnej wysokości ściany dla danego przekroju profilu oraz zwiększenia minimalnego wymaganego momentu bezwładności dla ściany o danej wysokości.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Wpływ na szczelność oraz izolacyjność ogniową przeszklonych ścian działowych ma w głównej mierze rodzaj zastosowanych materiałów oraz dokładność wykonania konstrukcji. Wyniki badań wskazują na to, że

jeśli ściana o małej wysokości zachowa swoją szczelność i izolacyjność ogniową w określonym czasie klasyfikacyjnym, to takiego samego zachowania oczekiwać należy od ścian wyższych, pod warunkiem że ściany te wykonane zostaną z tych samych materiałów, w taki sam sposób, maksymalny wymiar tafli szklanej nie zostanie przekroczony, a słupy ściany zostaną w odpowiedni sposób wzmocnione, tak aby uniknąć uszkodzenia ściany w pierwszych minutach badania. W takim przypadku efekt skali będzie miał niewielki wpływ na zachowanie kryteriów odporności ogniowej.

2. Istnieje zależność pomiędzy sztywnością profilu słupa przeszklonej ściany działowej, a jego ugięciem w trakcie badania w zakresie odporności ogniowej. Zależność ta opisana jest wzorem (6.1).
3. Na podstawie wzorów (6.12) i (6.13) oraz badania próbki o minimalnych wymiarach założonych w przyjętej procedurze oszacować można maksymalną wysokość przeszklonej ściany aluminiowej dla danego przekroju aluminiowego profilu, jak również minimalny wymagany moment bezwładności przekroju profilu, dla którego ścianka o danej wysokości zachowa swoją odporność ogniową.
4. Wysokość przeszklonej ściany działowej nie wpływa na temperaturę wewnątrz profili aluminiowych. Nie stwierdzono wpływu efektu skali na temperaturę wewnątrz profili. Na podstawie pomiarów temperatury wewnątrz profili słupów zauważyć można, że:
 - wewnętrzne kształtowniki profilu aluminiowego wytapiają się około 18. minuty badania w przypadku słupów środkowych oraz 30. minuty w przypadku słupa na krawędzi swobodnej,
 - zewnętrzne kształtowniki profilu głównego wytapiają się około 22. minuty badania dla słupów środkowych i 40. minuty w przypadku słupów skrajnych.
5. Z temperaturą wewnątrz profili ściśle powiązane są deformacje elementu próbnego. Szczyt deformacji w początkowej fazie badania związany jest z efektem bimetalicznym. Efekt ten wyraźnie słabnie przed 10. minutą badania, a dodatkowo topnienie kształtowników aluminiowych po stronie nagrzewanej sprawia, że deformacja ulega zmniejszeniu. Następnie z uwagi na dalszą degradację materiałów oraz stopniową utratę właściwości nośnych profili zewnętrznych deformacja ponownie wzrasta, jednakże już nie tak gwałtownie, jak w początkowej fazie badania. W normie badawczej zaleca się przeprowadzenie pierwszego pomiaru deformacji w 10. minucie testu. Badania prowadzone w ramach monografii wskazują, że największe deformacje nastąpiły w ciągu

pierwszych 5 minut badania, natomiast w 10. minucie badania wartość deformacji była zdecydowanie niższa. W celu określenia rzeczywistego maksymalnego ugięcia elementu próbnego pomiar deformacji powinien być prowadzony w sposób ciągły, tak jak w przypadku badań omówionych w monografii.

6. Na podstawie badań mikroskopowych zaobserwowano następujące zjawiska:
 - w profilach wyciętych z próbki poddanej badaniu odporności ogniowej w większości przypadków zaobserwowano większą wartość średniej średnicy ekwiwalentnej ziaren względem próbki odniesienia,
 - oddziaływanie wysokiej temperatury powstałej podczas badania odporności ogniowej powoduje niewielkie obniżenie mikrotwardości profili aluminiowych stanowiących szkielet konstrukcji.

W opisywanym obszarze wskazać można następujące kierunki dalszych badań:

1. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykonane były na elementach próbnym przeszklonych ścian wykonanych z aluminiowych profili trzykomorowych o symetrycznym przekroju, ze środkową komorą zabezpieczoną wkładem izolacyjnym. W ramach dalszych prac wykonać należy badania dla profili o innej konstrukcji, przykładowo:
 - trzykomorowych profili aluminiowych zawierających wkłady izolacyjne we wszystkich komorach (rozwiązanie charakterystyczne dla przegród o klasie odporności ogniowej EI 60),
 - aluminiowych o przekroju niesymetrycznym,
 - stalowych,
 - drewnianych.
2. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykonane były na elementach próbnym ścian przeszklonych pojedynczym szkłem o symetrycznej budowie. W ramach dalszych prac wykonać należy badania ścian zawierających przeszklenia pojedyncze o budowie niesymetrycznej oraz przeszklenia zespolone (charakterystyczne dla konstrukcji zewnętrznych).
3. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykonane były na elementach próbnym zamontowanych wewnątrz sztywnej konstrukcji mocującej. W ramach dalszych prac wykonać można badania ścian zamontowanych w podatnych konstrukcjach mocujących oraz ścian zamontowanych do czoła stropów żelbetowych (rozwiązanie charakterystyczne dla ścian osłonowych).

BIBLIOGRAFIA

- [1] SEŁDAK B.: Efekt skali w ocenie odporności ogniowej pionowych przegród przeszklonych. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2021 [mps, rozprawa doktorska]
- [2] PLOTNIKOV A.: Architectural and engineering principles and innovations in the construction of glass-façade buildings. *Vestnik MGSU* 2015, no. 11, pp. 7–15 (doi: 10.22227/1997-0935.2015.11.7-15)
- [3] SIEBERT B.: Modern Facades made of Glass. *IABSE Congress Reports* 2008, vol. 17, no. 9, pp. 342–343 (doi: 10.2749/222137908796292911)
- [4] LAUFS W., LUIBLE A.: Introduction on use of glass in modern buildings. *Rapport N° ICOM 462*, Londyn 2003
- [5] SULIK P., SEŁDAK B., TURKOWSKI P., WĘGRZYŃSKI W.: Bezpieczeństwo pożarowe budynków wysokich i wysokościowych. [W:] *Budownictwo na obszarach zurbanizowanych*, Nauka, praktyka, perspektywy. Pod red. A. Halickiej. Politechnika Lubelska, Lublin 2014, pp. 105–120
- [6] GLASS R. A., RUBIN A. I.: Fire safety for high-rise buildings. National Bureau of Standards, Gaithersburg 1979
- [7] SASSI S. i inni: Fire safety engineering applied to high-rise building facades. *MATEC Web of Conferences* 2016, vol. 46, p. 04002 (doi: 10.1051/matecconf/20164604002)
- [8] KOSIOREK M., ŁASKOWSKA Z.: Bezpieczeństwo pożarowe – część XV. Ogniochronne przegrody przeszklone. *Materiały Budowlane* 2007, vol. 1, pp. 117–119
- [9] SULIK P., SEŁDAK B.: Ochrona przeciwpożarowa w przegrodach wewnętrznych. *Izolacje* 2015, vol. 20, no. 9, pp. 30–34
- [10] BOROWY A.: Badania odporności ogniowej wewnętrznych przegród budowlanych oraz stolarki otworowej. *Inżynier Budownictwa* 2013, vol. 11, pp. 64–68
- [11] SULIK P., SEŁDAK B., KINOWSKI J.: Bezpieczeństwo pożarowe ścian zewnętrznych. Część 1. Elewacje szklane, wymagania, badania, przykłady. *Ochrona Przeciwpożarowa* 2014, vol. 50, no. 4/14, pp. 10–16
- [12] SULIK P., SEŁDAK B., KINOWSKI J.: Bezpieczeństwo pożarowe ścian zewnętrznych. Część 2. Mocowanie okładzin elewacyjnych. *Ochrona Przeciwpożarowa* 2015, vol. 51, no. 1/15, pp. 9–12

- [13] KINOWSKI J., SULIK P.: Bezpieczeństwo użytkowania elewacji *Materiały Budowlane* 2014, vol. 9, pp. 38–39
- [14] SULIK P., SEDŁAK B.: Odporność ogniowa pionowych przegród przeszklonych. Część 2. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 9, pp. 31–32, 34–35
- [15] KINOWSKI J., SULIK P., SEDŁAK B.: Badania i klasyfikacja systemów pionowych przegród przeszklonych o określonej klasie odporności ogniowej. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2016, vol. 42, no. 2, pp. 135–140 (doi: 10.12845/bitp.42.2.2016.14)
- [16] SEDŁAK B.: Wymagania z zakresu nienośnych przegród przeciwpożarowych. Przeszkłone ściany osłonowe i działowe, drzwi i bramy. [W:] Budynek wielofunkcyjny z częścią usługowo-handlową i garażem podziemnym – w aspekcie projektowania, wykonawstwa i odbioru przez PSP: Materiały pomocnicze do wykładów. Archmedia, Warszawa 2016, pp. 43–62
- [17] SEDŁAK B., SULIK P., KINOWSKI J.: Wymagania i rozwiązania techniczne systemów pionowych przegród przeszklonych o określonej klasie odporności ogniowej. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2016, vol. 42, no. 2, pp. 167–171 (doi: 10.12845/bitp.42.2.2016.18)
- [18] SULIK P., SEDŁAK B.: Odporność ogniowa pionowych przegród przeszklonych. Część 1. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 7–8, pp. 37–38, 40, 42–43
- [19] SEDŁAK B., SULIK P.: Odporność ogniowa pionowych elementów przeszklonych. *Szkło i Ceramika* 2015, vol. 66, no. 5, pp. 8–10
- [20] ROSZKOWSKI P., SEDŁAK B.: Metodyka badań odporności ogniowej dachów przeszklonych. *Świat Szkła* 2011, vol. 16, no. 6, pp. 50–52
- [21] ROSZKOWSKI P., SEDŁAK B.: Badania odporności ogniowej poziomych elementów przeszklonych. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 12, pp. 46–51
- [22] KORYCKI O., KUCZYŃSKI K.: Zasady wprowadzania do obrotu stolarki budowlanej w świetle PN-EN 14351-1:2006. *Materiały Budowlane* 2007, vol. 8, pp. 94–96
- [23] JAKIMOWICZ M.: Okna i drzwi balkonowe w świetle obowiązującego prawa. *Świat Szkła* 2010, vol. 7–8, pp. 61–65
- [24] SEDŁAK B.: Metodyka badań odporności ogniowej drzwi przeszklonych. Część 2. *Świat Szkła* 2012, vol. 17, no. 4, pp. 55–58, 60
- [25] SEDŁAK B.: Metodyka badań odporności ogniowej drzwi przeszklonych. Część 1. *Świat Szkła* 2012, vol. 17, no. 3, pp. 50–52, 60
- [26] SEDŁAK B.: Przeszkłone drzwi dymoszczelne – badania oraz klasyfikacja w zakresie dymoszczelności. *Świat Szkła* 2013, vol. 18, no. 4, pp. 35–38
- [27] IZYDORCZYK D., SEDŁAK B., SULIK P.: Fire Resistance of timber doors. Part II: Technical solutions and test results. *Annals of Warsaw University of Sciences.SGGW Forestry Wood Technology* 2014, vol. 86, pp. 129–132

- [28] BOROWY A.: Fire Resistance Testing of Glazed Building Elements. *Pożární ochrana* 2014, pp. 15–17
- [29] SULIK P., SĘDLAK B., IZDORCZYK D.: Odporność ogniowa i dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych na wyjściach awaryjnych z tuneli – badania i klasyfikacja. *Logistyka* 2014, no. 6, pp. 10104–10113
- [30] IZDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Fire Resistance of timber doors. Part I: Test procedure and classification. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2014, no. 86, pp. 125–128
- [31] IZDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Problematyka prawidłowego odbioru wybranych oddzieleń przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane* 2014, no. 11, pp. 62–64
- [32] SULIK P., SĘDLAK B.: Odporność ogniowa drzwi z dużymi przeszkleniami. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 3, pp. 38–42
- [33] SULIK P., IZDORCZYK D., SĘDLAK B.: Elementy decydujące o awariach wybranych oddzieleń przeciwpożarowych. [W:] *Materiały z XXVII Konferencji Naukowo-Technicznej „Awaryje budowlane”*. Szczecin – Międzyzdroje 20–23 maja 2015, pp. 771–778
- [34] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P.: Odporność ogniowa i dymoszczelność drzwi zgodnie z PN-EN 16034. *Materiały Budowlane* 2015, vol. 1, no. 11, pp. 67–69 (doi: 10.15199/33.2015.11.20)
- [35] IZDORCZYK D., SULIK P.: Odporność ogniowa drzwi stalowych. *Materiały Budowlane* 2015, vol. 1, no. 7, pp. 33–36 (doi: 10.15199/33.2015.07.07)
- [36] SULIK P., SĘDLAK B.: Wybrane zagadnienia związane z drzwiami przeciwpożarowymi. *Inżynier Budownictwa* 2015, no. 11, pp. 90–97
- [37] SCHMIDT A.: Projekt normy wyrobu dla drzwi wewnętrznych: prEN 14351-2 – stan prac. *Świat Szkła* 2015, vol. 5, pp. 27–29
- [38] SULIK P., SĘDLAK B.: Prawidłowy odbiór przeszklonych drzwi przeciwpożarowych. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 2, pp. 46–49,56
- [39] IZDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Izolacyjność ogniowa drzwi przeciwpożarowych. *Izolacje* 2016, vol. 21, no. 1, pp. 52–63
- [40] SĘDLAK B., FRĄCZEK A., SULIK P.: Wpływ zastosowanego rozwiązania progowego na dymoszczelność drzwi przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane* 2016, vol. 1, no. 7, pp. 26–29 (doi: 10.15199/33.2016.07.07)
- [41] IZDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Thermal insulation of single leaf fire doors. Test results comparison in standard temperature-time fire scenario for different types of doorsets. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016 (doi: 10.14311/asfe.2015.077)
- [42] SULIK P., IZDORCZYK D., SĘDLAK B.: Bezinwazyjna weryfikacja poprawności wykonania i montażu drzwi przeciwpożarowych. [W:] *Problemy*

- techniczno-prawne utrzymania obiektów budowlanych. Ogólnopolska konferencja. Warszawa, 22-23 stycznia 2016, pp. 147–150
- [43] SĘDLAK B., SULIK P.: Badania odporności ogniowej i dymoszczelności drzwi przeszklonych zgodnie z wymaganiami normy wyrobu PN-EN 16034. Część 1. *Świat Szkła* 2017, vol. 2, pp. 30–35
- [44] SĘDLAK B., SULIK P.: Badania odporności ogniowej i dymoszczelności drzwi przeszklonych zgodnie z wymaganiami normy wyrobu PN-EN 16034. Część 2. *Świat Szkła* 2017, vol. 3, pp. 40, 42–43
- [45] IZYDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Thermal insulation of single leaf fire doors: Test results comparison in standard temperature-time fire scenario for different types of doorsets. *Applications of Structural Fire Engineering* 2015, pp. 484–489 (doi: 10.14311/asfe.2015.077)
- [46] SĘDLAK B., SULIK P.: Wymagania dotyczące klasy odporności ogniowej zamknięć otworów w przegrodach przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane* 2017, vol. 1, no. 3, pp. 68–70 (doi: 10.15199/33.2017.03.19)
- [47] IZYDORCZYK D., SĘDLAK B., PAPIŚ B., TURKOWSKI P.: Doors with Specific Fire Resistance Class. *Procedia Engineering* 2017, vol. 172, pp. 417–425 (doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.010)
- [48] IZYDORCZYK D., SĘDLAK B., SULIK P.: Fire doors in tunnels emergency exits – smoke control and fire resistance tests. [In:] *IFireSS 2017. 2nd International Fire Safety Symposium*. Italy, Naples, June 7-9 2017, pp. 1–8
- [49] SĘDLAK B., SULIK P., IZYDORCZYK D.: Behaviour of Timber Doors in Fire Conditions. [W:] *Wood and Fire Safety*. Springer International Publishing 2020, pp. 152–158 (doi: 10.1007/978-3-030-41235-7_23)
- [50] IZYDORCZYK D., SULIK P., KINOWSKI J., SĘDLAK B.: Fireresistance of timber windows – Part II: Technical solutions and test results. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2015, vol. 92, pp. 113–116
- [51] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P., IZYDORCZYK D.: Fire resistance of timber windows – Part 1: Test procedure and classification. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2015, vol. 92, pp. 183–187
- [52] CHOW W. K., GAO Y., CHOW C. L.: A Review on Fire Safety in Buildings with Glass Façade. *Journal of Application Fire Sciences* 2006, vol. 16, no. 3, pp. 201–223 (doi: 10.2190/AF.16.3.b)
- [53] SĘDLAK B.: Badania odporności ogniowej przeszklonych ścian osłonowych. Część 2. *Świat Szkła* 2012, vol. 17, no. 10, pp. 53–58,60
- [54] SĘDLAK B.: Badania odporności ogniowej przeszklonych ścian osłonowych. Część 1. *Świat Szkła* 2012, vol. 17, no. 9, pp. 52–54

- [55] SĘDLAK B., KINOWSKI J.: Badania odporności ogniowej ścian osłonowych – przyrosty temperatury na szybach. *Świat Szkła* 2013, vol. 18, no. 11, pp. 20–25
- [56] ANDERSON J., JANSSON R.: Façade fire tests – measurements and modeling. *MATEC Web of Conferences* 2013, vol. 9, p. 2003 (doi: 10.1051/mateconf/20164603002)
- [57] SĘDLAK B., KINOWSKI J., BOROWY A.: Fire resistance tests of large glazed aluminium curtain wall test specimens. Results comparison. *MATEC Web of Conferences* 2013, vol. 9, p. 02009 (doi: 10.1051/mateconf/20130902009)
- [58] SĘDLAK B.: Odporność ogniowa ścian osłonowych z dużymi przeszkleńiami. Część 1. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 3, pp. 16–19,25
- [59] SĘDLAK B.: Odporność ogniowa ścian osłonowych z dużymi przeszkleńiami. Część 2. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 5, pp. 28–31
- [60] SĘDLAK B.: Badania odporności ogniowej przeszklonych ścian osłonowych wg nowego wydania normy PN-EN 1364-3. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 7–8, pp. 49–53
- [61] SULIK P., SĘDLAK B.: Bezpieczeństwo pożarowe przeszklonych elewacji. *Materiały Budowlane* 2015, vol. 1, no. 9, pp. 20–22 (doi: 10.15199/33.2015.09.04)
- [62] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P.: Izolacyjność ogniowa aluminiowo-szklanych ścian osłonowych w zależności od sposobu wypełnienia profili szkieletu konstrukcyjnego. *Izolacje* 2015, vol. 20, no. 2, pp. 48–53
- [63] SULIK P., SĘDLAK B.: Bezpieczeństwo pożarowe szklanych fasad. *Murator Informator Budowlany – Fasady* 2015, pp. 38–42
- [64] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P.: Large glazing in curtain walls - Study on impact of fixing methods on fire resistance. *MATEC Web of Conferences* 2016, vol. 46, p. 05004 (doi: 10.1051/mateconf/20164605004)
- [65] SULIK P., SĘDLAK B., KINOWSKI J.: Study on critical places for maximum temperature rise on unexposed surface of curtain wall test specimens. *MATEC Web of Conferences* 2016, vol. 46, p. 02006 (doi: 10.1051/mateconf/20164602006)
- [66] SĘDLAK B., SULIK P.: Odporność ogniowa pasów międzykondygnacyjnych aluminiowo-szklanych ścian osłonowych. *Izolacje* 2016, vol. 21, no. 1, pp. 66–73
- [67] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P., IZYDORCZYK D.: Fire resistance glazed constructions classification. Changes in the field of application. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016, pp. 460–465 (doi: 10.14311/asfe.2015.073)

- [68] SULIK P., KINOWSKI J., SEDŁAK B.: Fire resistance of aluminium glazed curtain walls. Test results comparison depending on the side of fire exposure. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016, pp. 478–483 (doi: 10.14311/asfe.2015.076)
- [69] SULIK P., KIMBAR G., SEDŁAK B.: Fire resistance of spandrels in aluminium glazed curtain walls. [In:] IFireSS 2017 – 2nd International Fire Safety Symposium. Italy, Naples, June 7-9, 2017
- [70] SEDŁAK B., KINOWSKI J., SULIK P.: Miejsca krytyczne elementów próbných przeszklonych ścian osłonowych pod względem izolacyjności ogniowej. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2017, vol. 45, no. 1, pp. 38–50 (doi: 10.12845/bitp.45.1.2017.3)
- [71] SULIK P., SEDŁAK B.: Wybrane aspekty oceny odporności ogniowej przeszklonych elementów oddzielenia przeciwpożarowego. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture* 2017, vol. 64, pp. 17–29 (doi: 10.7862/rb.2017.100)
- [72] SULIK P., SEDŁAK B.: Wybrane aspekty oceny odporności ogniowej przeszklonych elementów oddzielenia przeciwpożarowego. [W:] 63. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. Krynica Zdrój, 17–22.09.2017 r.
- [73] LASKOWSKA Z., KOSIOREK M.: Bezpieczeństwo pożarowe ścian działowych przeszklonych – badania i rozwiązania. *Świat Szkła* 2008, vol. 1, pp. 16–21
- [74] ROSZKOWSKI P., SEDŁAK B.: Metodyka badań odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych. *Świat Szkła* 2011, vol. 16, no. 9, pp. 59–64
- [75] SEDŁAK B., ROSZKOWSKI P.: Klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych. *Świat Szkła* 2012, vol. 17, no. 7–8, pp. 54–59
- [76] LASKOWSKA Z., BOROWY A.: Rozszerzone zastosowanie wyników badań odporności ogniowej ścian działowych przeszklonych wg PN-EN 15254-4. *Materiały Budowlane* 2012, vol. 7, pp. 62–64
- [77] SEDŁAK B.: Systemy przegród aluminiowo szklanych o określonej klasie odporności ogniowej. *Świat Szkła* 2013, vol. 18, no. 10, pp. 30–33,41
- [78] SEDŁAK B.: Bezsprosowe szklane ściany działowe o określonej klasie odporności ogniowej. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 11, pp. 24,26,28,30
- [79] SEDŁAK B.: Badania odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 2, pp. 30–33
- [80] SEDŁAK B.: Ściany działowe z pustaków szklanych – badania oraz klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej. *Świat Szkła* 2014, vol. 19, no. 1, pp. 30–33

- [81] SEDŁAK B., IZYDORCZYK D., SULIK P.: Fire Resistance of timber glazed partitions. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2014, vol. 85, pp. 221–225
- [82] SEDŁAK B., SULIK P.: Odporność ogniowa wielkogabarytowych pionowych elementów przeszklonych. *Materiały Budowlane* 2015, vol. 1, no. 7, pp. 28–30 (doi: 10.15199/33.2015.07.06)
- [83] SEDŁAK B.: Bezpieczeństwo pożarowe przeszklonych ścian działowych. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 5, pp. 34–40
- [84] SULIK P., SEDŁAK B.: Odporność ogniowa drewnianych przeszklonych ścian działowych. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 3, pp. 43–48, 56
- [85] SEDŁAK B., SULIK P., ROSZKOWSKI P.: Fire resistance tests of aluminium glazed partitions with timber insulation inserts. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2015, vol. 92, pp. 395–398
- [86] SEDŁAK B., IZYDORCZYK D., SULIK P., ALUMINIUM GLAZED PARTITIONS WITH TIMBER INSULATION INSERTS – FIRE RESISTANCE TESTS RESULTS DEPENDING ON THE TYPE OF USED WOOD. *ANNALS OF WARSAW UNIVERSITY OF SCIENCES. SGGW FORESTRY WOOD TECHNOLOGY* 2016, VOL. 92, PP. 102–106
- [87] SEDŁAK B., SULIK P.: Badanie i klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych według wymagań nowego wydania normy badawczej. Część 1. *Świat Szkła* 2016, vol. 21, no. 2, pp. 38–40, 42
- [88] SEDŁAK B., SULIK P.: Badanie i klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych zgodnie z wymaganiami nowego wydania normy badawczej. Część 2. *Świat Szkła* 2016, vol. 21, no. 5, pp. 27–28, 30–34
- [89] SEDŁAK B., KINOWSKI J., IZYDORCZYK D., SULIK P.: Fire resistance tests of aluminium glazed partitions. Results comparison. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016 (doi: 10.14311/asfe.2015.075)
- [90] SULIK P., SEDŁAK B., KINOWSKI J.: Study on critical places for maximum temperature rise on unexposed surface of walls with butt jointed glazing test specimens. [In:] IFireSS 2017 – 2nd International Fire Safety Symposium. Italy, Naples, 2017
- [91] SEDŁAK B., ROSZKOWSKI P., SULIK P.: Fire insulation of aluminium glazed partitions depending on the infill solution of framework profiles. *Civil and Environmental Engineering Reports* 2017, vol. 26, no. 3, pp. 91–107 (doi: 10.1515/ceer-2017-0038)
- [92] SEDŁAK B., KINOWSKI J., ROSZKOWSKI P., SULIK P.: Izolacyjność ogniowa przeszklonych ścian bezszprosowych. *Materiały Budowlane* 2017, vol. 1, no. 7, pp. 17–20 (doi: 10.15199/33.2017.07.05)

- [93] SĘDLAK B., SULIK P.: Ogólne zasady dotyczące badań odporności ogniowej elementów przeszklonych. Część 1. *Świat Szkła* 2018, vol. 23, no. 2, pp. 34–38
- [94] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r. nr 75, poz. 690)
- [95] WRÓBLEWSKI B., BOROWY A.: Płyty gipsowo-kartonowe – odporność ogniowa ścian nienośnych. *Izolacje* 2010, vol. 10, pp. 39–41
- [96] BOROWY A., ŁUKOMSKI M., WOŹNIAK G.: Metody oceny odporności ogniowej ścian skonstruowanych na szkielecie stalowym z obudową z płyt gipsowo-kartonowych. *Materiały Budowlane* 2017, vol. 1, no. 8, pp. 8–11 (doi: 10.15199/33.2017.08.02)
- [97] THOMAS G.: Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire and Materials* 2002, vol. 26, issue 1, pp. 37–45 (doi: 10.1002/fam.786)
- [98] ROSZKOWSKI P., SULIK P.: Wooden stud walls – problems with regard to structural fire design according to PN-EN 1995-1-2. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2014, vol. 87, pp. 181–185
- [99] ROSZKOWSKI P., SULIK P., SĘDLAK B.: Fire resistance of timber stud walls. *Annals of Warsaw University of Sciences. SGGW Forestry Wood Technology* 2015, vol. 92, pp. 368–372
- [100] NGUYEN T.-D., MEFTAH F., CHAMMAS R., MEBARKI A.: The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Safety Journal* 2009, vol. 44, issue 4, pp. 629–641 (doi: 10.1016/j.firesaf.2008.12.006)
- [101] NARAYANAN N., RAMAMURTHY K.: Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites* 2000, vol. 22, issue 5, pp. 321–329 (doi: 10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- [102] ZAPOTOCZNA-SYTEK G., SULIK P., WOŹNIAK G., ABRAMOWICZ M.: Przegrody budowlane wykonane z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK), a bezpieczeństwo pożarowe. [W:] *Materiały z 8. Konferencji „Dni betonu” Tradycja i nowoczesność*, 2014, pp. 803–814
- [103] GHAZI WAKILI K., HUGI E., KARVONEN L., SCHNEUWLIN P., WINNEFELD F.: Thermal behaviour of autoclaved aerated concrete exposed to fire. *Cement and Concrete Composites* 2015, vol. 62, pp. 52–58 (doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.018)
- [104] DAVIES J. M.: *Lightweight sandwich construction*. John Wiley & Sons, Oxford 2008

- [105] ROSZKOWSKI P., SULIK P.: Sandwich panels – behavior in fire based on fire resistance tests. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016, pp. 411–416 (doi: 10.14311/asfe.2015.065)
- [106] WRÓBLEWSKI B., BOROWY A.: Badanie i klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej ścian i dachów z płyt warstwowych. *Izolacje* 2012, vol. 7–8, pp. 30–34
- [107] LOOYEH M. R. E., RADOS K., BETTESS P.: Thermochemical responses of sandwich panels to fire. *Finite Elements in Analysis and Design* 2001, vol. 37, no. 11, pp. 913–927 (doi: 10.1016/S0168-874X(01)00075-0)
- [108] EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services
- [109] EN 1364-1:2015 Fire resistance tests for non-load bearing elements. Part 1: Walls
- [110] KUCZYŃSKI K.: Kształtowniki metalowe z przekładką termiczną. *Materiały Budowlane* 2010, vol. 8, pp. 38–39
- [111] KINOWSKI J., SULIK P., SĘDLAK B.: Impact of improper storage and installation of glazed fire rated walls on their performance. *MATEC Web of Conferences* 2019, vol. 284, p. 02003 (doi: 10.1051/mateconf/201928402003)
- [112] CAMINO G., LOMAKIN S.: Intumescent materials. [In:] *Fire Retardant Materials*. Pod red. A. R. Horrocksa and D. Price’a Woodhead Publishing Limited, New York 2001, pp. 318–335
- [113] MODESTI M., LORENZETTI A., SIMIONI F., CAMINO G.: Expandable graphite as an intumescent flame retardant in polyisocyanurate–polyurethane foams. *Polymer Degradation and Stability* 2002, vol. 77, issue 2, pp. 195–202 (doi: 10.1016/S0141-3910(02)00034-4)
- [114] SĘDLAK B., SULIK P., IZDORCZYK D., ŁUKOMSKI M.: Fire-stop Wraps and Collars with Intumescent Materials – Performance Comparison. *Procedia Engineering* 2017, vol. 172, pp. 961–968 (doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.113)
- [115] SĘDLAK B.: Porównanie skuteczności działania opasek i kołnierzy ogniochronnych z materiałami pęczniejącymi. *Izolacje* 2013, vol. 18, no. 11–12, pp. 63–68
- [116] ZIELIŃSKI K.: Szkło ogniochronne. *Świat Szkła* 2008, vol. 1, pp. 9–11
- [117] LASKOWSKA Z., BOROWY A.: Szyby w elementach o określonej odporności ogniowej. *Świat Szkła* 2015, vol. 20, no. 12, pp. 10–15
- [118] LASKOWSKA Z., BOROWY A.: Szyby zespolone w elementach o określonej odporności ogniowej. *Świat Szkła* 2016, vol. 21, no. 3, pp. 15–20, 28

- [119] BURMISTROV I., VIKULOVA M., PANOVA L., YUDINTSEVA T.: Development of acrylate-based polymeric layers for fireproof laminated glass. *Fire Retardant Materials* 2017, p. 020003 (doi: 10.1063/1.5009828)
- [120] WU M., CHOW W. K., NI X.: Characterization and thermal degradation of protective layers in high-rating fire-resistant glass. *Fire and Materials* 2015, vol. 39, no. 1, pp. 26–40 (doi: 10.1002/fam.2228)
- [121] DEBUYSER M., SJÖSTRÖM J., LANGE D., HONFI D., SONCK D., BELIS J.: Behaviour of monolithic and laminated glass exposed to radiant heating. *Construction and Building Materials* 2017, vol. 130, pp. 212–229 (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.139)
- [122] ZHAN Y., XIA Z., XIN W., HAI-LUN L.: Application and Integrity Evaluation of Monolithic Fire-resistant Glass. *Procedia Engineering* 2011, vol. 11, pp. 603–607 (doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.702)
- [123] EN 1634-3:2004 Fire resistance and smoke control tests for door and shutter assemblies, openable windows and elements of building hardware. Smoke control test for door and shutter assemblies
- [124] EN 1634-1:2014+A1:2018 Fire resistance and smoke control tests for door and shutter assemblies, openable windows and elements of building hardware. Part 1: Fire resistance test for door and shutter assemblies and openable windows
- [125] EN 1363-1:2020 Fire resistance tests. General requirements
- [126] EN 60584-1:2013 Thermocouples. EMF specifications and tolerances
- [127] SEDŁAK B., SULIK P.: Ogólne zasady dotyczące badań odporności ogniowej elementów przeszklonych. Część 4. *Świat Szkła* 2018, vol. 23, no. 5, pp. 28–30, 32
- [128] EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements. Classification using test data from reaction to fire tests
- [129] PIEKARCZUK A., MAŁOWANY K., WIECH P., KUJAWIŃSKA M., SULIK P.: Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: experimental and numerical study. *Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences* 2015, vol. 63, no. 1, pp. 113–123 (doi: 10.1515/bpasts-2015-0013)
- [130] EN 1363-2:1999 Fire resistance tests. Alternative and additional procedures
- [131] SULIK P., SEDŁAK B.: Promieniowanie w zamknięciach przeciwpożarowych. *Materiały Budowlane* 2018, vol. 1, no. 5, pp. 90–91 (doi: 10.15199/33.2018.05.27)

- [132] RAJ P. K.: A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. *Journal of Hazardous Materials* 2008, vol. 159, no. 1, pp. 61–71 (doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.120)
- [133] WONG L. T.: Hazard of Thermal Radiation from a Hot Smoke Layer in Enclosures to an Evacuee. *Journal of Fire Sciences* 2005, vol. 23, no. 2, pp. 139–156 (doi: 10.1177/0734904105044673)
- [134] SAWICKI T.: Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków, w warunkach pożaru. *Bezpieczeństwo Pożarowe* 2004, vol. 7–8, pp. 35–38
- [135] EN 15254-4:2018: Extended application of results from fire resistance tests. Non-loadbearing walls. Glazed constructions
- [136] EN 1364-4:2014 Fire resistance tests for non-loadbearing elements. Curtain walling. Part configuration
- [137] KINOWSKI J., SĘDLAK B., SULIK P.: Large scale, faceted curtain walls fire resistance tests. [In:] FSF 2019 – 3rd International Symposium on Fire Safety of Facades. Paris 25 – 27.09.2019
- [138] BABRAUSKAS V., WILLIAMSON R. B.: The historical basis of fire resistance testing. Part I. *Fire Technology* 1978, vol. 14, no. 3, pp. 184–194 (doi: 10.1007/BF01983053)
- [139] BABRAUSKAS V., WILLIAMSON R. B.: The historical basis of fire resistance testing. Part II. *Fire Technology* 1978, vol. 14, no. 4, pp. 304–316 (doi: 10.1007/BF01998390)
- [140] HAMILTON S. B.: A Short History of the Structural Fire Protection of Buildings Particularly in England. Special Report No. 27. H.M.S.O., London 1958
- [141] BÖHME E.: Mittheilungen. Berlin 1891
- [142] GARY M.: Mittheilungen. Berlin 1900
- [143] Fire Tests with Partitions. Red Book, No. 53. British Fire Prevention Committee, London 1900
- [144] Fire Tests with Partitions. Red Book, No. 22. British Fire Prevention Committee, London 1899
- [145] Engineering News. Vol. 46 (December 26, 1901), pp. 482-486 and 489-490
- [146] WĘGRZYŃSKI W., TURKOWSKI P.: Material properties and the energy balance in standardized fire testing. *MATEC Web of Conferences* 2018, vol. 163, p. 07004 (doi: 10.1051/mateconf/201816307004)
- [147] WĘGRZYŃSKI W., TURKOWSKI P., ROSZKOWSKI P.: The discrepancies in energy balance in furnace testing, a bug or a feature? *Fire and Materials* 2020, vol. 44, no. 3, pp. 311–322 (doi: 10.1002/fam.2735)

- [148] KINOWSKI J.: Bezpieczeństwo pożarowe przeszklonych ścian osłonowych (kurtynowych). *Świat Szkła* 2015, vol. 5, pp. 8–14
- [149] GRAVIT M., GUMENYUK V., NEDRYSHKIN O.: Fire Resistance Parameters for Glazed Non-Load-Bearing Curtain Walling Structures. Extended Application. *Procedia Engineering* 2015, vol. 117, pp. 114–118 (doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.131)
- [150] CHOW C. L., CHOW W. K.: Experimental Studies on Fire Spread Over Glass Façade. [In:] *Energy Systems Analysis, Thermodynamics and Sustainability; Nano Engineering for Energy. Engineering to Address Climate Change. Volume 5. Parts A and B. Vancouver 2010*, pp. 415–422 (doi: 10.1115/IMECE2010-37363)
- [151] KINOWSKI J., SULIK P., SEDŁAK B.: Wpływ niewłaściwego magazynowania i montażu przeszklonych przegród przeciwpożarowych na ich skuteczność działania. [W:] *Awarie budowlane. Zapobieganie. Diagnostyka. Naprawy. Rekonstrukcje. ICSF, Międzyzdroje 2019*, pp. 335–340
- [152] SKEJIC D., ĆURKOVIĆ I., RUKAVINA M. J.: Behaviour of aluminium structures in fire. A review. *Applications of Structural Fire Engineering* 2016, 300–305 (doi: 10.14311/asfe.2015.047)
- [153] EN 1999-1-2 EUROCODE 9 DESIGN OF ALUMINIUM STRUCTURES. PART 1–2: Structural fire design
- [154] SULIK P.: Bariery prawne wykorzystania drewna konstrukcyjnego w budownictwie. *Materiały Budowlane* 2018, vol. 1, no. 12, pp. 92–94 (doi: 10.15199/33.2018.12.29)
- [155] PODAWCA K., PRZYWÓZKI M.: The Impact of Structural and Material Solutions for Glazing Connections on Deformation During Fire. *Safety and Fire Technology* 2019, vol. 53, no. 1, pp. 118–128 (doi: 10.12845/sft.53.1.2019.7)
- [156] LIU W., GE X., ZHANG Z.: Study of the relationship between thermal insulation behavior and microstructure of a fire-resistant gel containing silica during heating. *Fire and Materials* 2018, vol. 42, no. 1, pp. 44–49 (doi: 10.1002/fam.2455)
- [157] KOSIOREK M., GAŁKOWSKI Z.: Przeszklenia przeciwpożarowe. *Materiały Budowlane* 1998, vol. 4, pp. 54–56
- [158] PN-90/B-02851 Ochrona przeciwpożarowa. Metoda badania odporności ogniowej elementów budynku
- [159] DIN 4102-5:1977-09 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Feuerschutzabschlüsse, Abschlüsse in Fahrstachtwänden und gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Fire Behaviour of Building Materials and Building)

- [160] ISO 834:1975 Fire-resistance tests. Elements of building construction
- [161] EN 1364-3:2014 Fire resistance tests for non-loadbearing elements. Curtain walling. Full configuration (complete assembly)
- [162] KOUDJIS J., CSOKE C.: Fire resistance without fire resistant glazing. *MATEC Web of Conferences* 2013, vol. 9, p. 02001 (doi: 10.1051/mateconf/20130902001)
- [163] EMMONS H.: The Needed Fire Science. *Fire Safety Science* 1986, vol. 1, pp. 33–53 (doi: 10.3801/IAFSS.FSS.1-33)
- [164] DEBUYSER M., SJÖSTRÖM J., LANGE D., HONFI D., SONCK D., BELIS J.: Behaviour of monolithic and laminated glass exposed to radiant heating. *Construction and Building Materials* 2017, vol. 130, pp. 212–229 (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.139)
- [165] WANG Y. i inni: Fracture behavior of a four-point fixed glass curtain wall under fire conditions. *Fire Safety Journal* 2014, vol. 67, pp. 24–34 (doi: 10.1016/j.firesaf.2014.05.002)
- [166] WANG Y., HU J.: Performance of laminated glazing under fire conditions. *Composite Structures* 2019, vol. 223, p. 110903 (doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110903)
- [167] WANG Y. i inni: Experimental study on critical breaking stress of float glass under elevated temperature. *Materials and Design* 2014, vol. 60, pp. 41–49 (doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.038)
- [168] WANG Y., WANG Q., SU Y., SUN J., HE L., LIEW K. M.: Fracture behavior of framing coated glass curtain walls under fire conditions. *Fire Safety Journal* 2015, vol. 75, pp. 45–58 (doi: 10.1016/j.firesaf.2015.05.002)
- [169] PAGNI P., JOSHI A.: Users Guide to Break. The Berkeley Algorithm for Breaking Window Glass in a Compartment Fire. *Fire Safety Science – Proceedings of the third international symposium*. Elsevier Applied Science London and New York. Edinburgh, 8-12 July 1991, pp. 791-802
- [170] SHIELDS T. J., SILCOCK G. W. H., FLOOD M.: Performance of a single glazing assembly exposed to enclosure corner fires of increasing severity. *Fire and Materials* 2001, vol. 25, no. 4, pp. 123–152 (doi: 10.1002/fam.764)
- [171] SHIELDS T. J., SILCOCK G. W. H., FLOOD M.: Performance of a single glazing assembly exposed to a fire in the centre of an enclosure. *Fire and Materials* 2002, vol. 26, no. 2, pp. 51–75 (doi: 10.1002/fam.783)
- [172] HARADA K., ENOMOTO A., UEDE K., WAKAMATSU T.: An Experimental Study On Glass Cracking And Fallout By Radiant Heat Exposure. *Fire Safety Science* 2000, vol. 6, pp. 1063–1074 (doi: 10.3801/IAFSS.FSS.6-1063)
- [173] KESKI-RAHKONEN O.: Breaking of window glass close to fire. *Fire and Materials* 1988, vol. 12, no. 2, pp. 61–69 (doi: 10.1002/fam.810120204)

- [174] BABRAUSKAS V.: Glass breakage in fires. Fire Science and Technology Inc., Clarkdale 2011 [dostępne w: <https://www.doctorfire.com/Glass-Break.pdf>, 22]
- [175] PAGNI P.: 2002 Howard W. Emmons Invited Plenary Lecture - Thermal Glass Breakage. *Fire Safety Science* 2003, vol. 7, pp. 3–22 (doi: 10.3801/IAFSS.FSS.7-3)
- [176] SEDŁAK B., KINOWSKI J., SULIK P., KIMBAR G.: The risks associated with falling parts of glazed facades in case of fire. *Open Engineering* 2018, vol. 8, no. 1, pp. 147–155 (doi: 10.1515/eng-2018-0011)
- [177] SHAO Q., LI F., CHEN T., SUN Z.: Heat resistance and water protection effectiveness for large single-pane fireproof glass. *Journal of Central South University of Technology* 2011, vol. 18, no. 6, pp. 2185–2191 (doi: 10.1007/s11771-011-0961-6)
- [178] SHAO G. i inni: Maximum temperature to withstand water film for tempered glass exposed to fire. *Construction and Building Materials* 2014, vol. 57, pp. 15–23 (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.094)
- [179] WU C., LIN T., LEI M., CHUNG T., HUANG C., CHIANG W.: Fire Test On A Non-heat-resistant Fireproof Glass With Down-flowing Water Film. *Fire Safety Science* 2005, vol. 8, pp. 327–338 (doi: 10.3801/IAFSS.FSS.8-327)
- [180] WU C.-W., LIN T.-H.: Full-scale evaluations on heat resistance of glass panes incorporated with water film or sprinkler in a room fire. *Building and Environment* 2007, vol. 42, no. 9, pp. 3277–3284 (doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.017)
- [181] BEDON C.: Structural Glass Systems under Fire: Overview of Design Issues, Experimental Research, and Developments. *Advances in Civil Engineering* 2017, vol. 2017, pp. 1–18 (doi: 10.1155/2017/2120570)
- [182] SEDŁAK B., KIMBAR G., KINOWSKI J., SULIK P.: Study of aluminium glazed partitions stiffness influence on deflection in fire resistance tests. [In:] *Proceedings of Applications of Structural Fire Engineering ASFE 2019*, 2019, pp. 424–429
- [183] SEDŁAK B., SULIK P., GARBACZ A.: Fire resistance of aluminium-glazed partitions depending on their height. *Fire and Materials* 2021, p. fam. 2971 (doi: 10.1002/fam.2971)
- [184] SEDŁAK B., SULIK P., GARBACZ A.: Scale effect in the evaluation of the fire resistance of glazed partitions. *Journal of Building Engineering* 2022, vol. 49, p. 104108 (doi: 10.1016/j.job.2022.104108)
- [185] ADAMCZYK-CIEŚLAK B., MIZERA J., KURZYDŁOWSKI K. J.: Microstructures in the 6060 aluminium alloy after various severe plastic deformation

- treatments. *Materials Characterization* 2011, vol. 62, no. 3, pp. 327–332 (doi: 10.1016/j.matchar.2011.01.009)
- [186] van HUIS M. A., CHEN J. H., ZANDBERGEN H. W., SLUITER M. H. F.: Phase stability and structural relations of nanometer-sized, matrix-embedded precipitate phases in Al–Mg–Si alloys in the late stages of evolution. *Acta Materialia* 2006, vol. 54, no. 11, pp. 2945–2955 (doi: 10.1016/j.actamat.2006.02.034)
- [187] PRZYBYSZ S. i inni: Anisotropy of mechanical and structural properties in AA 6060 aluminum alloy following hydrostatic extrusion process. *Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences* 2019, vol. 67, no. 4, pp. 709–717 (doi: 10.24425/bpasts.2019.130180)

INSTYTUT TECHNIKI BUDOWLANEJ (ITB)

Podstawowym celem badań naukowych i prac rozwojowych prowadzonych w Instytucie Techniki Budowlanej od początku jego działalności (1945) było i jest zapewnienie jakości polskiego budownictwa oraz ochrona interesów użytkowników obiektów budowlanych. Badania naukowe i prace rozwojowe wykonywane przez Instytut na potrzeby budownictwa obejmują szeroki zakres zagadnień związanych z podstawowymi wymaganiami dotyczącymi obiektów budowlanych, w szczególności:

- bezpieczeństwo konstrukcji • bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych • bezpieczeństwo i dogodność użytkowania • bezpieczeństwo instalacji elektrycznych • zrównoważone budownictwo • racjonalizacja użytkowania energii i wody • ochrona przed hałasem i drganiami oraz wpływ drgań na człowieka i konstrukcje • środowisko (w tym oddziaływanie materiałów na zdrowie oraz warunki sanitarne w pomieszczeniach) • wzajemne oddziaływanie środowiska, użytkowanie obiektów i działalność budowlana • trwałość (w tym ochrona przed wilgocią oraz korozją chemiczną i biologiczną) • podłoże budowlane • użytkowanie instalacji sanitarnych, przemysłowych i przeciwpożarowych • skuteczność instalacji wykrywania, powiadamiania i sygnalizacji pożaru • utrzymanie elementów wyposażenia obiektów budowlanych (w tym zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz okuć budowlanych).

W wyniku prowadzonych prac Instytut opracowuje:

- podstawy wymagań techniczno-użytkowych stawianych budynkom i wyrobom budowlanym,
- metody obliczania i projektowania budynków oraz elementów budowli,
- metody badań i kryteria oceny obiektów, ich elementów i wyrobów budowlanych,
- techniczne podstawy polityki budowlanej państwa.

Oprócz dwóch lokalizacji w Warszawie, ITB posiada trzy oddziały zamiejscowe. Oddział Śląski w Katowicach specjalizuje się w zagadnieniach z zakresu budownictwa na terenach poddanych wpływowi górniczej deformacji terenu oraz badaniach zamocowań konstrukcyjnych i instalacyjnych. Oddział Wielkopolski w Poznaniu prowadzi działalność badawczą i aprobacyjną związaną z okuciami budowlanymi i ślusarką budowlaną oraz elementami wyposażeniowymi i wykończeniowymi, w tym do technicznego zabezpieczenia budynków i pomieszczeń przed włamaniem. Oddział Mazowiecki w Pionkach wykonuje badania wyrobów, elementów konstrukcji i instalacji w warunkach pożaru.

BUILDING RESEARCH INSTITUTE (ITB)

The basic aim of research and development works carried out at the ITB, from the very beginning of its activity (1945), was to ensure the quality of the Polish building industry and to protect the interests of users of the construction works. The research and development works carried out by the Institute for the purposes of construction embrace a wide scope of issues related to fundamental requirements of building law that should be met by building facilities, in particular the following:

- safety of structures • fire safety of building objects • safety in use • sustainable construction • safety of electric installations • rationalization of energy and water use in buildings • protection against noise and vibrations and the impact of vibrations on humans and buildings • environment (including the impact of materials on health and sanitary indoor conditions) • interaction between the environment, the use of buildings and construction • durability of civil engineering works (including protection against moisture as well as chemical and biological corrosion) • foundation soil • use of installation systems • maintenance of building components (including fire-protection systems and those related to evacuation of people and construction fittings).

As a result of the works carried out, the Institute develops:

- the bases of technical and functional requirements for buildings and building products,
- methods for calculation and designing of building elements,
- test methods and assessment criteria for construction works, their elements and building products,
- technical bases for the building policy of the State.

Besides two locations in Warsaw, the ITB has three remote branches. The Silesian Branch in Katowice deals with construction upon mining exploitation areas and with testing of joint elements. The Wielkopolska Branch in Poznań is concerned with research and approval activities related to the constructions fittings, metal-work and finishing and auxiliary products, including building burglary protection. The Mazovian Branch in Pionki deals with testing durability and tightness of construction products and building components under fire condition.

Adres / Address: ul. Filtrowa 1, 00-611 Warszawa, tel/fax: 22 825-13-03



Dr inż. Bartłomiej Sędlak

Absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, gdzie w 2009 r. ukończył studia magisterskie na kierunku budownictwo w specjalności budownictwo ogólne, a w 2013 r. studia doktoranckie w zakresie budownictwa w naukach technicznych. W 2021 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport w Instytucie Techniki Budowlanej.

Pracownik Zakładu Badań Ognioowych Instytutu Techniki Budowlanej, gdzie obecnie pełni funkcję Kierownika Pracowni Odporności Ogniowej Przegród, Elementów Instalacyjnych i Dymoszczelności. Specjalista z zakresu badań odporności ogniowej przeszklonych ścian działowych i osłonowych, drzwi, okien, uszczelnień przejść instalacyjnych oraz złączy liniowych.

Autor lub współautor kilkudziesięciu artykułów technicznych i naukowych (opublikowanych m.in. w *Fire and Materials*, *Journal of Building Engineering*, *Open Engineering*) oraz kilkuset opinii technicznych z obszaru bezpieczeństwa pożarowego obiektów budowlanych.