

Marian Gwóźdź^{a)*}, Michał Marcinowski^{b)}

^{a)} University of Bielsko Biala / Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej

^{b)} Aluprof S.A.

* Corresponding author / Autor korespondencyjny: magwozd@ad.ath.bielsko.pl

Fire Resistance of Aluminum-Glass Partitions with a Parallel Structure of Intumescent Layers

Odporność ogniowa przegród aluminiowo-szklanych o strukturze równoległej warstw pęczniejących

ABSTRACT

Aim: The aim of the article is to verify the fire resistance of aluminum-glass construction partitions with a parallel structure. The paper presents the results of tests in a fire chamber of a selected partition, a leading national manufacturer of aluminum-glass systems. The results of the fire tests were used to validate a simple parallel model of the reliability of non-renewable systems.

Introduction: Fire-retardant properties of partitions made of glass and aluminum profiles determine their ability to stop the spread of fire by closing the fire in separate zones. Fire resistance of such partitions is measured according to various criteria, in particular the requirements concern: stability *R* (glass does not break), tightness *E*, radiation limitation *W* and insulation *I*. The tightness requirement *E* means that the partition effectively protects the fire compartment against flames, smoke and hot gases. The insulating postulate *I* means that the average temperature of glass and the profiles on the surface of the partition on the protected side does not exceed the contractual value during the nominal duration of the fire. The measure of fire resistance of a partition is time *t*, expressed in minutes, in which the structure of an aluminum-glass partition meets one or more of the criteria listed.

Methodology: The experimental database consists of the results of routine fire resistance tests of system building partitions obtained in the certification process of selected facade systems. Interpretation of the obtained results of laboratory tests was based on simple models of reliability of non-renewable systems.

Conclusions: The graphs of average temperature increase on the outer surface of the tested glass are the same in each case in terms of quality and quantity. Up to about 70% of the nominal fire resistance, the temperature increase is linear, followed by a non-linear phase according to a concave curve. The course of the temperature-rise curves on the outer surface of aluminum profiles is qualitatively different. The graphs are non-linear, convex from the beginning of heating, with the inflection point reached after about 20 minutes of the test. The obtained results may indicate that the multi-chamber structure of aluminum profiles does not ensure a parallel reliability structure, because the object has a quasi-parallel structure. The presented results of the temperature-rise curves and their reliability interpretation require confirmation in further laboratory tests of aluminum-glass partitions with a different structure of panes and profiles.

Keywords: glass, partitions, laboratory tests, fire resistance, reliability

Type of article: case study

Received: 14.02.2022; Reviewed: 16.02.2022; Accepted: 02.03.2022;

Authors' ORCID IDs: M. Gwóźdź – 0000-0002-9762-4279; M. Marcinowski – 0000-0003-0258-8541;

The authors contributed the equally to this article;

Please cite as: SFT Vol. 59 Issue 1, 2022, pp. 130–140, <https://doi.org/10.12845/sft.59.1.2022.7>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest weryfikacja eksperymentalna odporności ogniowej przegród budowlanych aluminiowo-szklanych o strukturze równoległej. W pracy przedstawiono wyniki badań w komorze ogniowej na przykładzie przegrody wiodącego krajowego producenta systemów aluminiowo-szklanych. Wyniki testów ogniowych wykorzystano do walidacji prostego modelu równoległego niezawodności systemów nieodnawialnych.

Wprowadzenie: Właściwości ognioochronne wykonanych ze szkła i profili aluminiowych przegród budowlanych określają ich zdolność do zatrzymania rozprzestrzeniania się ognia poprzez zamknięcie pożaru w wydzielonych strefach. Odporność ogniowa takich przegród jest mierzona wg różnych kryteriów. W szczególności wymagania dotyczą: stabilności *R* (szkło nie pęka), szczelności *E*, ograniczenia promieniowania *W* i izolacyjności *I*. Postulat szczelności *E* oznacza, że przegroda skutecznie chroni strefę wydzielenia pożarowego przed płomieniami, dymem i gorącymi gazami. Z kolei postulat izolacyjności *I* świadczy o tym, że średnia temperatura szyby i profili na powierzchni przegrody po stronie chronionej nie przekracza umownej wartości w nominalnym

czasie trwania pożaru. Miarą odporności ogniowej przegrody jest czas t wyrażony w minutach, w którym konstrukcja przegrody aluminiowo-szklanej spełnia jedno lub kilka z wymienionych kryteriów.

Metodologia: Bazę danych doświadczalnych stanowią wyniki rutynowych badań odporności ogniowej systemowych przegród budowlanych otrzymane w procesie certyfikacji wybranych systemów fasadowych. Interpretację wyników badań laboratoryjnych oparto na prostych modelach niezawodności systemów nieodnawialnych.

Wnioski: Wykresy przyrostu temperatury średniej na zewnętrznej powierzchni badanych szyb są w każdym wypadku jakościowo i ilościowo takie same. Do momentu osiągnięcia około 70% nominalnej ogniochronności przyrost temperatury jest liniowy, po czym następuje faza nieliniowa wg krzywej wklęsłej. Jakościowo inny jest przebieg krzywych przyrostu temperatury na zewnętrznej powierzchni profili aluminiowych. Wykresy są od początku nagrzewania nieliniowe, wypukłe, z punktem przegięcia osiągniętym już po około 20 minutach testu. Otrzymane rezultaty mogą wskazywać, że wielokomorowość profili aluminiowych nie zapewnia struktury niezawodnościowej równoległej, ponieważ obiekt ma strukturę quasi-równoległą. Przedstawione wyniki krzywych przyrostu temperatury i ich interpretacja niezawodnościowa wymagają potwierdzenia w dalszych badaniach laboratoryjnych przegród aluminiowo-szklanych o innej konstrukcji szyb i profili.

Słowa kluczowe: niezawodność, testy laboratoryjne, szkło, odporność ogniowa, przegrody

Typ artykułu: studium przypadku

Przyjęty: 14.02.2022; **Zrecenzowany:** 16.02.2022; **Zaakceptowany:** 02.03.2022;

Identyfikatory ORCID autorów: M. Gwóźdź – 0000-0002-9762-4279; M. Marcinkowski – 0000-0003-0258-8541;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu;

Proszę cytować: SFT Vol. 59 Issue 1, 2022, pp. 130–140, <https://doi.org/10.12845/sft.59.1.2022.7>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Introduction

The article describes fire tests of the selected MB-118 EI 120 system partition, carried out by an accredited testing laboratory [1] at the request of Aluprof S.A. as part of documenting relevant technical approvals. In the above-mentioned laboratory tests, fire tests of the model partition were carried out in a furnace generating a temperature according to ISO standard fire curve:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

where:

Θ_g – gas temperature in a fire chamber [°C],

t – heating time [min].

In the article, the testing was limited to partitions made of fire-resistant multilayer laminated glass, meeting the postulate of a simple model with parallel elements [2]. Considered in the theory of reliability, the simplest object that cannot be renewed, e.g. fire-resistant glass, is characterized by two mutually exclusive random states: the state of efficiency in which it meets the EI requirements and the state of inoperability when it does not meet the requirements. Efficiency is synonymous with fitness and disability is synonymous with unfitness. The time t which elapses from the moment the fire ignites until the last fireproof layer in the glass partition is damaged, is the time of correct operation of the analyzed object. Time t is a random variable with a probability distribution depending on the insulating properties of the partition and the fire intensity and the set of E , I , W . When modeling reliability $Q(t)$ of an aluminum-glass partition, it can be assumed that at the beginning of the fire the object is fit, i.e. $Q(t=0) = 1$, and the fire operation conditions of the partition are established.

Wprowadzenie

W artykule opisano badania ogniowe przegrody systemowej MB-118 EI 120, przeprowadzone przez akredytowane laboratoria badawcze [1] na zlecenie Aluprof S.A. w ramach dokumentowania odpowiednich aprobat technicznych. W przywołanych badaniach laboratoryjnych testy ogniowe modelowej przegrody przeprowadzono w piecu wytwarzającym temperaturę wg krzywej pożaru standardowego ISO:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

gdzie:

Θ_g – temperatura gazu w komorze ogniowej [°C],

t – czas ogrzewania [min].

W artykule ograniczono badania do przegród wykonanych z szyb ogniochronnych wielowarstwowych laminowanych, spełniających postulat prostego modelu o elementach równoległych [2]. Rozpatrywany w teorii niezawodności najprostszy, niepodlegający odnowie obiekt, np. szyba ogniochronna, charakteryzuje się dwoma wzajemnie wykluczającymi się stanami losowymi: stanem sprawności, w którym spełnia postawione wymagania EI i stanem niesprawności, gdy nie spełnia wymagań. Synonimem sprawności jest zdatność, a niesprawności – niezdatność. Czas t , jaki upływa od chwili rozgorzenia ognia aż do chwili uszkodzenia ostatniej warstwy ogniochronnej w przegrodzie szklanej, jest czasem poprawnej pracy analizowanego obiektu. Czas t jest zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa zależnym od właściwości izolacyjnych przegrody oraz od intensywności pożaru i ustalonego zbioru cech zdatności E , I , W . Modelując niezawodność $Q(t)$ przegrody aluminiowo-szklanej można założyć, że na początku pożaru obiekt jest zdalny, czyli $Q(t=0) = 1$, a warunki eksploatacji pożarowej przegrody są

The basic characteristic of the partition reliability is the reliability function $Q(t)$, also called the survival function. It describes the deterioration of the partition reliability with the passage of time of fire exposure and at the same time presents the probability of the serviceability of an unrepairable object, at least up to a fixed moment of time t , counting from the flashover time:

$$Q(t) = P\{T \geq t\} = 1 - P\{T < t\} = 1 - F(t) \quad (2)$$

Reliability $Q_r(t) = Q_r$ of an object with a parallel structure, in case when the failures of each of the n components are mutually independent failures, it is given by the formula:

$$Q_r = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) \quad (3)$$

In the special case of a homogeneous object $Q_i = Q$ from the formula (3) we get:

$$Q_r = 1 - (1 - Q)^n \quad (4)$$

From the transformation of the formula (4), it is possible to determine the requirements of the minimum reliability Q of individual homogeneous elements, e.g. fireproof layers (in a shaft) for a given standardized reliability of the entire object Q_r :

$$Q = 1 - \sqrt[n]{1 - Q_r} \quad (5)$$

Taking, for example, the reliability of the entire system at level $Q_r = 0.95$ (characteristic value in the standards for designing building structures), we obtain from formula (5): for $n = 1$ – reliability of the insulation layer $Q = 0.95$, for $n = 2$ – single layer reliability $Q = 0.776$, and for $n = 15$ layers – layer reliability $Q = 0.181$. Formulas (2–5) can be used for the analytical interpretation of the following thesis: Multilayer fire-resistant glass panes are an element of the parallel reliability system in a partition consisting of glass and aluminum profiles, and the entire partition under fire conditions is described by a mixed series-parallel model with non-renewable elements.

Laboratory tests of fire resistance of the MB-118 EI 120 system partition

The results of fire resistance tests [1] of a model of a glazed partition wall with dimensions of 3004 x 3752 mm, made of aluminum profiles of the Aluprof MB-118 EI system are shown in Figure 1. The diagram shows the location of the measuring thermocouples. The wall model was made and assembled by the research team of Aluprof S.A. The partition was divided into six fields (five glazed and one non-transparent), with the dimensions listed in Table 1. Five chamber-aluminum profiles with a construction width of 118 mm made of AW 6060 and AW 6063 alloys were used. Profile chamber (see Figure 2) filled with insulation inserts made of F-type plasterboards, which were to ensure fire resistance EI 120 minutes. In case of glazing, meeting fire resistance

ustalone. Podstawową charakterystyką niezawodności przegrody jest funkcja niezawodności $Q(t)$ nazywana także funkcją przetrwania. Opisuje ona obniżanie się niezawodności przegrody i zwiększenie z upływem czasu ekspozycji pożarowej. Równocześnie przedstawia ona prawdopodobieństwo zdatności obiektu nienaprawialnego, co najmniej do ustalonej chwili czasu t , licząc od chwili rozgorzenia:

$$Q(t) = P\{T \geq t\} = 1 - P\{T < t\} = 1 - F(t) \quad (2)$$

W sytuacji gdy uszkodzenia każdego z n elementów składowych są uszkodzeniami wzajemnie niezależnymi, wówczas niezawodność $Q_r(t) = Q_r$ obiektu o strukturze równoległej wyrażona jest wzorem:

$$Q_r = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) \quad (3)$$

W szczególnym przypadku obiektu jednorodnego $Q_i = Q$ ze wzoru (3) otrzymujemy:

$$Q_r = 1 - (1 - Q)^n \quad (4)$$

Z przekształcenia wzoru (4) można wyznaczyć wymagania minimalnej niezawodności Q pojedynczych elementów jednorodnych, np. warstw ogniochronnych w szybie dla zadanej znormalizowanej niezawodności całego obiektu Q_r :

$$Q = 1 - \sqrt[n]{1 - Q_r} \quad (5)$$

Przyjmując dla przykładu niezawodność całego układu na poziomie $Q_r = 0,95$ (wartość charakterystyczna w normach projektowania konstrukcji budowlanych), ze wzoru (5) otrzymujemy: dla $n = 1$ – niezawodność warstwy izolacyjnej $Q = 0,95$, dla $n = 2$ – niezawodność pojedynczej warstwy $Q = 0,776$, a dla $n = 15$ warstw – niezawodność warstwy $Q = 0,181$. Wzory (2–5) mogą być wykorzystane do analitycznej interpretacji następującej tezy: szyby ogniochronne wielowarstwowe stanowią w przegrodzie złożonej z szyb i profili aluminiowych element układu niezawodnościowego równoległego, a całą przegrodę w warunkach pożaru opisuje model mieszany szeregowo-równoległy o nieodnawialnych elementach.

Badania laboratoryjne odporności ogniowej przegrody systemowej MB-118 EI 120

Na rycinie 1 przedstawiono wyniki badań odporności ogniowej [1] modelu przeszklonej ściany działowej o wymiarach 3004 x 3752 mm, wykonanej z profili aluminiowych systemu Aluprof MB-118 EI. Na schemacie podano lokalizację termoelementów pomiarowych. Model ściany został wykonany i zmontowany przez zespół badawczy Aluprof S.A. Przegrodę podzielono na sześć pól (pięć przeszklonych i jedno pole nieprzeziernie) o wymiarach zestawionych w tabeli 1. Zastosowano profile aluminiowe pięciokomorowe, o szerokości konstrukcyjnej 118 mm ze stopów AW 6060 i AW 6063. Komory profili (zob. ryc. 2) wypełniono wkładami izolacyjnymi z płyt gipsowo-kartonowych typu F, które miały zapewnić odporność ogniową

condition required the use of laminated glass composed of 15 layers.

EI 120 minut. W wypadku przeszkleń spełnienie warunku ogniochronności wymagało zastosowania szyb laminowanych złożonych z 15 warstw.



- thermocouples for average (maximum) temperature measurement / termoelementy do pomiaru temperatury średniej (maksymalnej)
- thermocouples for maximum temperature measurement / termoelementy do pomiaru temperatury maksymalnej
- ▼ place of measuring the deformation / miejsce pomiaru deformacji

Figure 1. Diagram of a partition and arrangement of measuring thermocouples
Rycina 1. Schemat przegrody i plan rozmieszczenia termoelementów pomiarowych

Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

Table 1. Designations and dimensions of the sample element fields
Tabela 1. Oznaczenia i wymiary pól elementu próbnego

Lp.	Glass designation / Oznaczenie szyb	Panel dimensions [mm] / Wymiary pola [mm]	Filling / Wypełnienie
1	1	668 x 1068	
2	2	668 x 1068	
3	3	1420 x 1068	
4	4	1400 x 2500	
5	5	1420 x 1436	4x F-type plasterboard, 15 mm thick each, 1mm steel sheet on both sides / 4x płyta gipsowo-kartonowa typu F o grubości 15 mm każda, obustronnie blacha stalowa 1mm
6	6	1420 x 1000	Glass Pyrostop, type 120-10 / Szyba Pyrostop, typ 120-10

Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

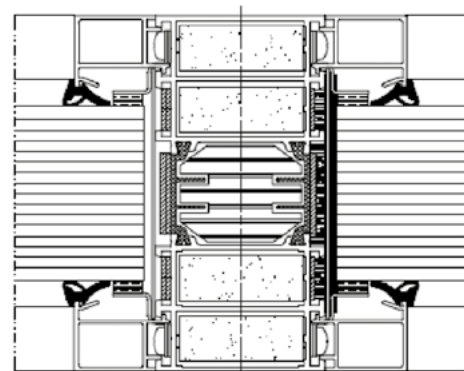


Figure 2. A fragment of an aluminum-glass partition: cross-section through a five-chamber MB-118 profile and Pilkington Pyrostop type 120-10 laminated glass panes
Rycina 2. Fragment przegrody aluminiowo-szklanej: przekrój przez profil pięciokomorowy MB-118 i szyby laminowane Pilkington Pyrostop typ 120-10

Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

The conditions under which the fire resistance test was carried out were recorded, in particular the ambient temperature was $t_o = 14.7^\circ\text{C}$ and the relative air humidity in the laboratory 32.8%. The temperature in the furnace during the heating of the partition was measured with 16 plate thermometers, and the results of these measurements are shown in Figure 3 which indicate good compliance of the heated air temperature in the furnace with the standard curve according to the formula (1). In Figure 3 the lower curve describes the lowest temperature, the upper temperature, and the intermediate one is the ISO curve (1). The partition during heating was under constant supervision, and the most important changes and damages noticed during the heating test are summarized in Table 2.

Podczas badania określono warunki, w jakich przeprowadzono próbę ognioodporności, a w szczególności temperaturę otoczenia $t_o = 14.7^\circ\text{C}$ i wilgotność względną powietrza w laboratorium wynoszącą 32,8%. Temperatura w piecu w trakcie ogrzewania przegrody była mierzona za pomocą 16 termometrów płytkowych, a wyniki tych pomiarów pokazano na rycinie 3. Wskazują one na dobrą zgodność temperatury ogrzewanego powietrza w piecu z krzywą standardową wg wzoru (1). Na rycinie 3 dolna krzywa opisuje temperatury najniższe, z kolei górna najwyższe, a pośrednia to krzywa ISO (1). Przegroda w trakcie ogrzewania była pod stałym nadzorem, a najważniejsze zmiany i uszkodzenia zauważone w trakcie próby ogrzewania zestawiono w tabeli 2.

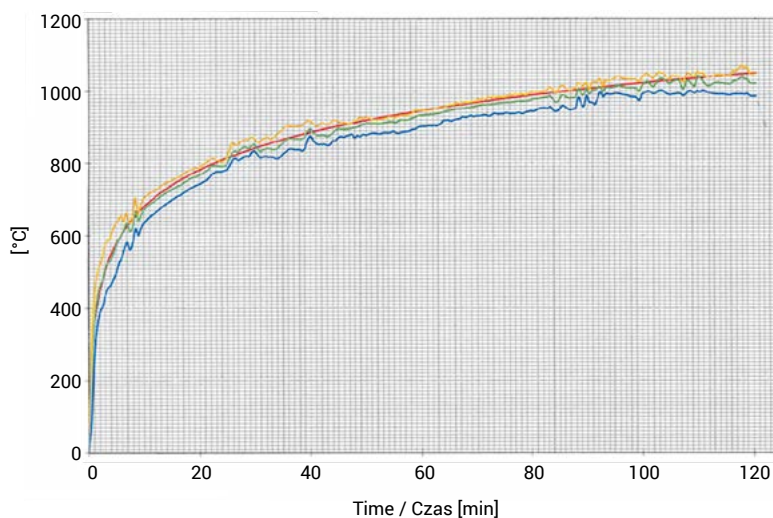


Figure 3. Diagrams of partition heating temperature
Rycina 3. Wykresy temperatury nagrzewania przegrody
Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

The experimental mean temperature rise curves on the outer surfaces of the glass panes during the test were similar in all fields, therefore in Figure 4 representative results are shown as recorded on the largest glass pane (pane no. 4 according to Figure 1). The lower curve (blue) describes the measurements of the mean temperature of the thermocouple no. 7, the other curves correspond to the measurements from the thermocouples numbers 5, 6, 8 and 9.

Doświadczalne krzywe przyrostu temperatury średniej na zewnętrznych powierzchniach szyb w czasie testu były we wszystkich polach podobne, dlatego na rycinie 4 pokazano jako reprezentatywne rezultaty zarejestrowane na największej szybie (szyba nr 4 na ryc. 1.). Krzywa dolna (kolor niebieski) obrazuje pomiary temperatury średniej termoelementu (nr 7), pozostałe krzywe odpowiadają pomiarom z termoelementów (numery 5, 6, 8 i 9).

Table 2. Description of damage during the fire resistance test of the partition
Tabela 2. Opis uszkodzeń w trakcie próby ognioodporności przegrody

Time / Czas	Type of damage / Rodzaj uszkodzenia
1' 0"	The internal panes of fields 2, 3, 4 and 6 break as indicated in Table 1 / Pękają wewnętrzne szyby pól 2, 3, 4 i 6 wg oznaczeń z tablicy 1
1' 30"	Windows start to turn white / Szyby zaczynają bieleć
2' 15"	Smoke in the upper corner of glass pane no. 4 (field marked in bold) / Dym w górnym narożu szyby nr 4 (pole oznaczone czcionką wytłuszczoną)
2' 40"	Glass 1, 2, 3 and 6 white, glass 4 green / Szyby nr 1, 2, 3 i 6 białe, szyba nr 4 zielona
3' 40"	Smoke in the lower corner of glass no. 3 / Dym w dolnym narożu szyby nr 3
5' 30"	Yellow stains appeared on all panes / Na wszystkich szybach wystąpiły żółte plamy
9' 0"	Smoke at individual corners of all panes / Dym w pojedynczych narożach wszystkich szyb
20'	Thermocouple 2 comes off (at 32' 25" thermocouple 11 comes off) / Odkleja się termoelement nr 2 (w 32' 25" odkleja się termoelement nr 11)
65' 40"	The seal in the glass 6 comes out, the seal in the glass 3 came out in 18' / Wysuwa się uszczelka w szybie nr 6, w 18' wysunęła się uszczelka w szybie nr 3
80' 17"	All panes white with brown spots / Na wszystkich szybach białych pojawiły się brązowe plamy
83'	In shaft 4, the gel layer breaks off and flows into the furnace / W szybie nr 4 warstwa żelu odspaja się i wpada do środka pieca
91' 12"	Glass no. 4 turns white (glass no. 6 in 94', glass no. 1 and no. 3 in 97') / Szyba nr 4 bieleje (szyba nr 6 bieleje w 94', a szyby nr 1 i nr 3 w 97')
95' 10"	In shaft no. 3, the gel layer detaches and flows into the furnace / W szybie nr 3 warstwa żelu odspaja się i wpada do środka pieca
114'	Smoke is released through cracks in shaft no. 4 / W szybie nr 4 przez spękania w szybie wydostaje się dym
120'	Glass no. 4 strongly cracked and bent towards the inside of the furnace; end of test 121' / Szyba nr 4 mocno spękana i wygięta do wnętrza pieca; koniec badania 121'

Source: Technical report [1].
 Źródło: Raport techniczny [1].

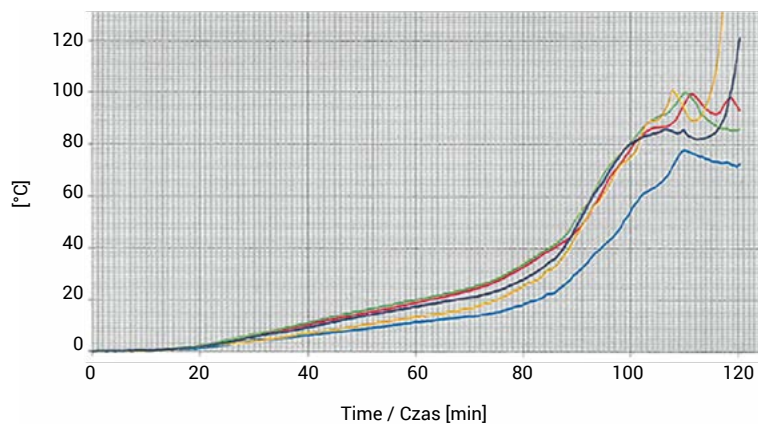


Figure 4. Graphs of the mean temperature increase at measurement points on the outer surface of the glass pane no. 4 (1400 x 2500 mm)
Rycina 4. Wykresy przyrostu temperatury średniej w punktach pomiarowych na zewnętrznej powierzchni szyby nr 4 (1400 x 2500 mm)

Source: Technical report [1].
 Źródło: Raport techniczny [1].

The results of the measurements of the temperature rise on the outer surfaces of the aluminum profiles were similar for all installed thermocouples. In Figure 5 exemplary results obtained in the measuring points (22) – green curve, (25) – blue curve and (26) – yellow curve are shown. These are qualitatively different curves than those shown for the panes in Figure 4, because they are characterized by a clear inflection point after about 1/6 of the heating time (concave curves were recorded for the panes). The curve shown in Figure 5 deviates from this regularity in red because it describes the increase in the maximum temperature on glass no. 4 at the measuring point (20).

Rezultaty pomiarów przyrostu temperatury na zewnętrznych powierzchniach profili aluminiowych były dla wszystkich zainstalowanych termoelementów podobne. Na rycinie 5 pokazano przykładowe wyniki uzyskane w punktach pomiarowych (22) – krzywa zielona, (25) – krzywa niebieska i (26) – krzywa żółta. Są to krzywe jakościowo inne niż krzywe dla szyb pokazane na rycinie 4, ponieważ charakteryzują się wyraźnym punktem przegięcia po ok. 1/6 czasu ogrzewania (dla szyb zarejestrowano krzywe wklęsłe). Krzywa koloru czerwonego pokazana na rycinie 5 odbiega od tej prawidłowości, ponieważ opisuje przyrost temperatury maksymalnej na szybie nr 4 w punkcie pomiarowym (20).

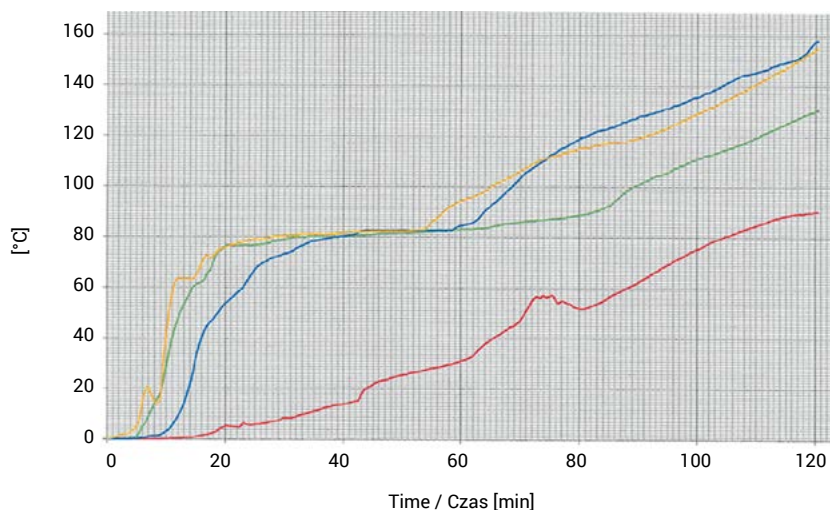


Figure 5. Graphs of temperature rise on the outer surface of the profiles (three upper curves) and glass no. 4 (lower curve)
Rycina 5. Wykresy przyrostu temperatury na zewnętrznej powierzchni profili (trzy krzywe górne) i szyby nr 4 (krzywa dolna)
Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

During the heating of the partition, horizontal displacements were recorded in five selected points on the profiles (see Figure 1, points A, C and E) and shafts (see Figure 1, points D and E). The measured displacements are summarized in Table 3, in which the + sign indicates the bend towards the inside of the furnace. The displacements of + 76 mm and + 78 mm at points B and C should be assessed as significant as they are clearly visible to the naked eye. The lack of symmetry of displacements at points B and D is the result of different construction of both fields (point B is located on the laminated glass, and point D on the non-transparent surface).

W trakcie ogrzewania przegrody rejestrowano przemieszczenia poziome w pięciu wybranych punktach na profilach (zob. ryc. 1, punkty A, C i E) i sztybach (zob. ryc. 1, punkty D i E). Punkty pomiarowe przemieszczeń zestawiono w tabeli 3, w której znak + oznacza wygięcie do wnętrza pieca. Przemieszczenia + 76 mm i + 78 mm w punktach B i C należy ocenić jako znaczne, ponieważ są one wyraźnie widoczne gołym okiem. Brak symetrii przemieszczeń w punktach B i D jest rezultatem odmiennej konstrukcji obu pól (punkt B zlokalizowano na szybie laminowanej, a punkt D na powierzchni nieprzezierny).

Table 3. Values of horizontal displacements at partition measurement points
Tabela 3. Wartości przemieszczeń poziomych w punktach pomiarowych przegrody

Time <i>t</i> / Czas <i>t</i> [min]	Measurement points as shown in the diagram in Figure 1 / Punkty pomiarowe wg schematu na rycinie 1				
	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]
0	0	0	0	0	0
20	+ 28	+ 31	+ 33	+ 21	+ 2
40	+ 26	+ 21	+ 19	+ 12	0
60	+ 25	+ 26	+ 25	+ 13	0
80	+ 26	+ 45	+ 51	+ 26	+ 3
100	+ 24	+ 61	+ 61	+ 27	+ 2
110	+ 24	+ 62	+ 67	+ 30	+ 3
120	+ 26	+ 76	+ 78	+ 35	+ 3

Source: Technical report [1].
 Źródło: Raport techniczny [1].

View of the partition from the outside after the heating test is completed (121' of test) shown in Figure 6.

Widok przegrody od strony zewnętrznej po zakończonej próbie ogrzewania (121' testu) pokazano na rycinie 6.

Summary

The standard requirements [3–4] for fire resistance mean that the following conditions are met in the heating test of the tested partition:

- the glazing will not break under its own weight,
- there is no leakage of the partition and no penetration of fire or smoke to the outside,
- the glazing must ensure an effective fire shut-off throughout the test, i.e. outside the tested partition, no ignition or ignition of a cotton swab may occur,
- the temperature increase at the end of the test on the unheated side of the glass must not exceed 140°C on average, and only locally it may reach 180°C,
- the temperature rise at the end of the test on the unheated side of the aluminum profiles must not exceed 180°C.

Podsumowanie

Próba ogrzewania badanej przegrody opiera się na wymaganiach określonych w normach [3–4] w zakresie nierozprzestrzeniania się ognia i ognioodporności. W badaniu muszą być spełnione następujące warunki:

- przeszklenie nie ulegnie pęknięciu pod własnym ciężarem,
- nie dojdzie do nieszczelności przegrody i przenikania ognia lub dymu na zewnątrz,
- przeszklenie przez cały czas próby musi zapewniać skuteczne odcięcie ognia, tzn. na zewnątrz badanej przegrody nie może dojść do zapalenia lub zażarzenia próbnego wacika z bawełny,
- przyrost temperatury pod koniec próby na nieogrzewanej stronie szyby nie może przekroczyć średniej temperatury wynoszącej 140°C, a tylko lokalnie może osiągnąć ona max. 180°C,
- przyrost temperatury pod koniec próby na nieogrzewanej stronie profili aluminiowych nie może przekroczyć 180°C.



Figure 6. View of the partition from the outside after the heating test is completed
Rycina 6. Widok przegrody od strony zewnętrznej po zakończonej próbie ogrzewania

Source: Technical report [1].
Źródło: Raport techniczny [1].

The laboratory test results shown in Figures 4 and 5 prove that the tested partition meets the standard criteria of the nominal fire resistance EI 120 minutes in terms of temperature rise. The technical report [1] shows that also the other fire resistance criteria of this partition were met. Fire-resistant laminated glass according to Figure 2, composed of several repetitive gel layers, is a simple, non-renewable, parallel-structured reliability system. At a temperature of 120°C, the gel layers expand to form a hard, opaque layer that provides temporary protection against fire. A similar model of reliability seems to describe five-chamber aluminum profiles filled with thermal insulation (see Figure 2). Analysis of the temperature-rise curves according to Figures 4 and 5, however, does not confirm the model analogies for laminated glass and aluminum profiles. The graphs of the mean temperature increase on the outer surface of the glass pane no. 4, as well as on the other tested glass panes according to the report [1], are in each case the same in terms of quality and quantity. Up to approx. 80 minutes of heating (70% of nominal fire protection), the temperature increase is linear, followed by a non-linear phase according to a concave curve.

The course of the temperature-rise curves on the outer surface of aluminum profiles is different in terms of quality (see Figure 5 – the top three curves). The analyzed graphs are non-linear, convex from the beginning of the heating, with the inflection point reached after about 20 minutes of the test. The obtained results may indicate that the multi-chamber structure of aluminum profiles does not ensure a parallel reliability structure, see formulas (1)–(5), because such an object has a quasi-parallel structure.

Such an interpretation seems to be additionally confirmed by the almost linear graph of the increase in the maximum temperature on the glass pane 4 (see the lower curve drawn in red in Figure 5). The graph is characteristic for fire-resistant glass with a parallel structure of intumescent layers.

Wyniki badań laboratoryjnych pokazane na rycinach 4 i 5 dowodzą, że badana przegroda spełnia określone w normach kryteria nominalnej odporności ogniowej EI 120 minut w zakresie przyrostu temperatury. Raport techniczny [1] wskazuje, że także pozostałe kryteria ognioodporności tej przegrody zostały spełnione. Szyba laminowana ogniochronna przedstawiona na rycinie 2, złożona z kilku powtarzalnych warstw żelu, jest prostym, nieodnawialnym systemem niezawodnościowym o strukturze równoległej. W temperaturze 120°C warstwy żelu ekspandują, tworząc twardą, nieprzezroczystą powłokę stanowiącą czasowe zabezpieczenie przed pożarem. Podobny model niezawodności wydaje się opisywać pięciokomorowe profile aluminiowe wypełnione izolacją termiczną (zob. ryc. 2). Analiza krzywych przyrostu temperatury (zob. ryc. 4 i 5) nie potwierdza jednak analogii modelowych dla szyb laminowanych i profili aluminiowych. Wykresy przyrostu temperatury średniej na zewnętrznej powierzchni szyby nr 4, a także na pozostałych badanych szybach wg raportu [1], są w każdym wypadku jakościowo i ilościowo takie same. Do ok. 80 minuty ogrzewania (70% nominalnej ogniochronności) przyrost temperatury jest liniowy, po czym następuje faza nieliniowa wg krzywej wklęsłej.

Jakościowo inny jest przebieg krzywych przyrostu temperatury na zewnętrznej powierzchni profili aluminiowych (zob. ryc. 5 – trzy górne krzywe). Analizowane wykresy są od początku nagrzewania nieliniowe, wypukłe, z punktem przegięcia osiągniętym już po ok. 20 minutach testu. Otrzymane rezultaty mogą wskazywać, że wielokomorowość profili aluminiowych nie zapewnia struktury niezawodnościowej równoległej, zob. wzory (1)–(5), ponieważ obiekt taki ma strukturę quasi-równoległą.

Taką interpretację wydaje się dodatkowo potwierdzać niemal liniowy wykres przyrostu temperatury maksymalnej na szybie nr 4 (dolna krzywa narysowana na ryc. 5 kolorem czerwonym). Wykres ten jest charakterystyczny dla szyb ogniochronnych, o równoległej strukturze warstw pęczniących.

Conclusions

Due to the standardized nature of laboratory tests, reviews and contributions devoted to the subject of fire resistance of aluminum-glass partitions are available in the national literature, for example [5–8]. The publications that provide the results of fire resistance tests for other system partitions are particularly important. This is the nature of works [9–10] in which there are diagrams of temperature increases on the outer surfaces of the glass panes and profiles. The results on the aluminum profiles in these studies are consistent with those presented in Figure 5. It should be added, however, that the aforementioned tests [9–10] concerned partitions with a nominal fire resistance of EI 30, i.e. lower than the partition discussed in the article.

Temperature-rise curves and their reliability interpretation presented in Figures 4 and 5 require confirmation in further laboratory tests of aluminum-glass partitions of a different design. The testing should cover both partitions with a parallel structure, but with different nominal fire resistance (EI 60, EI 90, EI 180), as well as partitions made of glass with a single-chamber fire-resistant structure (alternative to laminated glass – single-chamber glazing with a thicker layer of gel). Many years of research conducted in the European Union countries have resulted in developing a technical document CEN / TC 250 N 1060 [11], drafted as part of the work of the European Committee for Standardization on the second edition of the Eurocodes (see also document [12]). This edition includes recommendations for the above-mentioned design of glass structures, in particular the development of a separate design standard, containing modern procedures for the design of glass structures.

The article presented above is a national contribution to the research on the reliability analysis of partitions with aluminum-glass structure, similarly to the previous works of the authors [13–14].

Wnioski

Z uwagi na znormalizowany charakter testów laboratoryjnych, prace przeglądowe i przyczynki poświęcone tematyce odporności ogniowej przegród aluminiowo-szklanych są dostępne w literaturze krajowej [5–8]. Szczególnie istotne są publikacje, w których podano wyniki badań odporności ogniowej innych przegród systemowych. Taki charakter mają prace [9–10], w których zamieszczono wykresy przyrostów temperatury na zewnętrznych powierzchniach szyb i profili. Wyniki na profilach aluminiowych są w tych pracach zbieżne z przedstawionymi na rycinie 5. Należy jednak dodać, że przywołane badania [9–10] dotyczyły przegród o nominalnej odporności ogniowej EI 30, czyli niższej niż przegroda omawiana w artykule.

Przedstawione na rycinach 4 i 5 krzywe przyrostu temperatury i ich interpretacja niezawodnościowa wymagają potwierdzenia w dalszych badaniach laboratoryjnych przegród aluminiowo-szklanych o innej konstrukcji. Badaniami należałoby objąć zarówno przegrody o strukturze równoległej, jednak o zróżnicowanej nominalnej ogniochronności (EI 60, EI 90, EI 180), jak i przegrody uformowane z szyb o konstrukcji ogniochronnej jednokomorowej (alternatywna wobec szyb laminowanych – konstrukcja szyb jednokomorowych z grubszą warstwą żelu).

Wieloletnie badania naukowe prowadzone w krajach Unii Europejskiej zostały zwieńczone dokumentem technicznym CEN/TC 250 N 1060 [11], zredagowanym w ramach prac Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego nad drugą edycją Eurokodów (zob. także dokument [12]). W edycji tego dokumentu przewidziano rekomendacje związane z projektowaniem konstrukcji szklanych, a w szczególności opracowaniem odrębnej normy projektowania, zawierającej nowoczesne procedury w zakresie projektowania konstrukcji budowlanych szklanych.

Przedstawiony wyżej artykuł stanowi przyczynek krajowy do badań w zakresie analizy niezawodności przegród o konstrukcji aluminiowo-szklanej, podobnie jak wcześniejsze prace autorów [13–14].

Literature / Literatura

- [1] Zespół Laboratoriów Badawczych akredytowany przez PCA, Raport techniczny nr LPP02-01036/11/R50N: Ściana działowa z profili aluminiowych, przeszklona, systemu ALUPROF MB-118EI; szkło Pyrostop 120-10. Warszawa 2011.
- [2] Gwóźdź M., *Fire reliability of system aluminum glass partitions*, „Archives of Civil Engineering” 2021, Vol. LXVII, Issue 4, 193–206, <https://doi.org/10.24425/ace.2021.131494>.
- [3] PN-EN 1364-1:2015 Badanie odporności ogniowej elementów nienośnych.
- [4] PN-EN 13501-2:2016+A1 Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 2: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej, z wyłączeniem instalacji wentylacyjnej.
- [5] Klinowski K., Sulik P., Sędkak B., *Badania i klasyfikacja systemów pionowych przegród przeszklonych o określonej klasie odporności ogniowej*, SFT, Vol 42 Issue 2, 2016, pp. 135–140, <https://doi.org/10.12845/bitp.42.2.2016.14>.
- [6] Laskowska Z., Borowy A., *Rozszerzone zastosowanie wyników badań odporności ogniowej ścian działowych przeszklonych wg PN-EN 15254-4*, „Materiały Budowlane” 2012, nr 7(479), 62–64.
- [7] Klinowski J., Sędkak B., Sulik P., *Izolacyjność ogniowa aluminiowo-szklanych ścian osłonowych w zależności od sposobu wypełnienia profilu szkieletu konstrukcyjnego*, „Izolacje” 2015, R. 20, nr 2, 48–53.
- [8] Sulik P., Sędkak B., *Odporność ogniowa pionowych przegród przeszklonych. Część 1*, „Świat Szkła” 2015, nr 7–8, 37–43, *Część 2*, „Świat Szkła” 2015, nr 9, 31–35.

- [9] Podawca K., Przywózki M., *Analiza przyrostu temperatury przeszklonych przegród pionowych wewnętrznych, narażonych na działanie ognia*, SFT, Vol. 55 Issue 1, 2020, pp. 16–300, <https://doi.org/10.12845/sft.55.1.2020.2>.
- [10] Sulik P., Sędkak B., *Wybrane aspekty oceny odporności ogniowej przeszklonych elementów oddzielenia przeciwpożarowego*, „Journal of Civil Engineering Environment and Architecture” 2017, T. XXXIV, Z. 64 (3/I/17), 17–19, <https://doi.org/10.7062/rb.2017.1400>.
- [11] Feldmann M., Kasper R. i in., Document CEN/TC 250 N 1060: Guidance for European structural design of glass components. JRC and Policy Reports, 2014.
- [12] Document CNR-DT 210/2013.: Guide for the design. Construction and control of buildings with structural glass elements. National Research Council of Italy 2013.
- [13] Gwóźdź M., *Formulae for buckling load bearing capacity of glass structure elements*, „Archives of Civil Engineering” 2020, Vol. LXVI, Issue 2, 2020, 353–368, <https://doi.org/10.24425/ace.2020.131814>.
- [14] Gwóźdź M., Woźniczka P., *New static analysis methods for plates made of monolithic and laminated glass*, „Archives of Civil Engineering” 2020, Vol. LXVI, Issue 4, 593–609, <https://doi.org/10.24425/ace.2020.135239>.

MARIAN GWÓŹDŹ, PROF., PH.D. ENG. – graduate, researcher and lecturer at the Faculty of Civil Engineering of the Cracow University of Technology in the years 1973–2019. From 2019, employed at the University of Technology and Humanities in Bielsko-Biała. His scientific achievements include over 100 scientific papers, including 10 monographs on the reliability, load-bearing capacity and stability of steel, aluminum and aluminum-glass structures. His engineering achievements include over 150 opinions, technical expertise and detailed designs, mainly large cubature buildings with a steel structure.

MICHAŁ MARCINOWSKI, M.SC. ENG. – product manager at Aluprof S.A. Associated with the company for several years, currently involved in product development, previously in designing, consulting and conducting conferences for manufacturers, architects and designers of window, door and facade systems.

PROF. DR HAB. INŻ. MARIAN GWÓŹDŹ – absolwent i pracownik naukowo-dydaktyczny Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej w latach 1973–2019. Od roku 2019 zatrudniony na Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Dorobek naukowy obejmuje przeszło 100 prac naukowych, w tym 10 monografii z zakresu niezawodności, nośności i stateczności konstrukcji stalowych, aluminiowych i aluminiowo-szklanych. Dorobek inżynierski to ponad 150 opinii, ekspertyz technicznych i projektów wykonawczych, głównie dużych budynków kubaturowych o konstrukcji stalowej.

MGR INŻ. MICHAŁ MARCINOWSKI – menedżer produktu w firmie Aluprof S.A. Związany z firmą od kilku lat, aktualnie zaangażowany w rozwój produktów, wcześniej w projektowanie, doradztwo oraz prowadzenie konferencji dla producentów, architektów i projektantów systemów okiennno-drzwiowych i fasadowych.