

dr inż. Paweł Sulik^{1*)}

ORCID: 0000-0001-8050-8194

dr inż. Bartłomiej Sędlak¹⁾

ORCID: 0000-0002-4715-6438

The influence of the mineral wool insulation dimensions on the fire resistance of steel pipe penetration seals in vertical fire partitions – part 2

Wpływ wymiarów izolacji z wełny mineralnej na odporność ogniową uszczelnień przejść stalowych rur przez pionowe przegrody przeciwpożarowe – część 2

DOI: 10.15199/33.2025.07.23

Abstract. The aim of the study was to verify the behaviour of higher density mineral wool in the context of equations used to estimate the fire resistance of seals for steel pipe penetrations of various diameters and uniform wall thicknesses. This work is a continuation of study [1]. The thermal insulation parameters taken into account in the analysis were: mineral wool density (higher density was tested and, for comparison, samples protected with mineral wool tested in study [1]), mineral wool thickness and length. As part of the work, a fire resistance test was carried out on the seals of steel pipe installations with three different diameters (from 60.3 mm to 168.3 mm), a total of 30 pipes, in various configurations of insulation thickness and length. The analysis of the test results showed that the length of the insulation used primarily affects the temperature increase measured on the pipe, while the thickness of the insulation is the key factor influencing the temperature increase recorded on the surface of the mineral wool.

Keywords: penetration seals; fire resistance; fire insulation; fire integrity; steel pipes; mineral wool.

The analysis discussed in this paper is a continuation of the study [1], assuming a change in the density of the mineral wool used. Modern construction has formally stringent requirements for fire safety, especially with regard to fire divisions separating fire zones, which is unfortunately not always carried out correctly, as evidenced by recent incidents both in Poland and worldwide. Installation penetrations, such as steel pipes crossing fire compartments, are potential points of weakness in the continuity of the compartmentation, through which fire, smoke and high temperatures can penetrate into adjacent spaces. For this reason, in accordance with EN 1366-3, all service penetrations should be sealed to maintain the integrity (E) and fire insulation (I) of the partition.

For steel pipes, which are a highly thermally conductive material, sealing the space between the pipe and the partition alone is not sufficient to ensure adequate fire insulation. In

Streszczenie. Celem pracy zaprezentowanej w artykule była weryfikacja zachowania wełny mineralnej o wyższej gęstości w kontekście obowiązywania równań umożliwiających szacowanie odporności ogniowej uszczelnień przejść instalacyjnych stalowych rur o różnej średnicy i jednakowej grubości ścianek. Jest to kontynuacja opracowania [1]. Parametrami izolacji termicznej uwzględnionymi w analizie były: gęstość wełny mineralnej (przebadano większą gęstość niż w pracy [1]); grubość wełny mineralnej oraz jej długość. Przeprowadzono też badanie odporności ogniowej uszczelnień przejść instalacyjnych stalowych rur o trzech różnych średnicach (od 60,3 do 168,3 mm), łącznie 30 rur, w różnych konfiguracjach grubości oraz długości izolacji. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że długość zastosowanej izolacji wpływa przede wszystkim na przyrost temperatury mierzonej na rurze, natomiast grubość izolacji jest kluczowym czynnikiem wpływającym na przyrost temperatury rejestrowany na powierzchni wełny mineralnej.

Słowa kluczowe: uszczelnienia przejść instalacyjnych; odporność ogniowa; izolacyjność ogniowa; szczelność ogniowa; rury stalowe; wełna mineralna.

Omawiana w artykule analiza stanowi kontynuację opracowania [1], przy założeniu zmiany gęstości zastosowanej wełny mineralnej. Współczesne budownictwo stawia formalnie rygorystyczne wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego, szczególnie w odniesieniu do przegród ogniowych oddzielających strefy pożarowe, co nie zawsze jest niestety poprawnie realizowane, o czym świadczą ostatnie zdarzenia zarówno w Polsce, jak i na świecie. Przejścia instalacyjne, takie jak rury stalowe przecinające przegrody ogniowe, stanowią potencjalne miejsca osłabienia ciągłości przegrody, przez które mogą przeniknąć do sąsiednich pomieszczeń ogień, dym i wysoka temperatura. Z tego powodu, zgodnie z normą EN 1366-3, wszystkie przejścia instalacyjne powinny być uszczelniane w sposób zapewniający zachowanie szczelności (E) i izolacyjności ogniowej (I) przegrody.

W przypadku rur stalowych, które są materiałem o dużej przewodności cieplnej, samo uszczelnienie przestrzeni między rurą a przegrodą nie jest wystarczające do zapewnienia odpowiedniej izolacyjności ogniowej. W praktyce stosuje się dodat-

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

^{*)} Correspondence address: p.sulik@itb.pl

practice, additional thermal insulation is used on the pipe, most often in the form of rock mineral wool (RMW), which has a high melting point, low thermal conductivity and is non-flammable (most often reaction to fire class A1).

Previous research confirms that the physicochemical parameters of RMW, such as bulk density, insulation thickness, mineral composition and fibre orientation, have a significant impact on its ability to insulate fire temperatures [2 – 5]. Andersen and Dyrboel [2] emphasise the importance of internal radiation in fibre materials, while Karamanos et al. [3] point to the dependence of thermal conductivity on the micro pore structure. Krasnovski et al. [4], as well as Grinchuk [5], analysed RMW thermal stability and thermal conductivity under high-temperature conditions.

Modelling of thermal conductivity and radiation in RMW is being developed in the context of engineering calculations. Veisheh and Hakkaki-Fard [6] presented a numerical approach to describe the coupled conductivity and radiation, while Paudel et al. [7] presented a multi-physics model for predicting the fire resistance of RMW-insulated elements.

Experimental work on the fire properties of RMW also appears in the national literature. In the studies described in [8], the effect of RMW density and thickness on the ability to reduce the temperature transfer resulting from the action of a standard fire was evaluated. It should be noted that these analyses referred primarily to the insulation as a separate element without considering the influence of the heat-conducting steel pipe.

Despite the large amount of research into the characteristics of RMW under fire conditions, there is a lack of detailed data in the scientific literature relating to the behaviour of steel pipes insulated with RMW in the context of an actual passage through a partition, e.g. at a fire zone boundary. Existing publications on sealing of installation penetrations are usually of a review nature and mainly describe the effectiveness of individual solutions, e.g. intumescent bands, sealing materials or the behaviour of the partition itself [9 – 10]. The configuration: steel pipe + mineral wool + baffle remains poorly recognised. Therefore, this paper presents the results of an experimental study on the fire resistance of installation penetrations of steel pipes with different diameters and the same wall thickness, protected by mineral wool insulation with a density higher than that tested and presented in the paper [1].

Materials and test methods

As part of the fire resistance test, 43 pipe penetrations with six different diameters and different wall thicknesses were sealed in a wall made of autoclaved cellular concrete with a thickness of 180 mm and a density of 600 kg/m³. In this paper, the results of three diameters (30 pipes in total), which were characterised by the same wall thickness and dimensions (diameter × wall thickness), are analysed at:

- $\varnothing 60.3 \times 3.6$ mm – 12 pcs;
- $\varnothing 114.3 \times 3.6$ mm – 10 pcs;
- $\varnothing 168.3 \times 3.6$ mm – 8 pcs.

kową izolację termiczną na rurze, najczęściej w postaci skalnej wełny mineralnej (SWM), charakteryzującej się wysoką temperaturą topnienia, niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz niepalnością (najczęściej klasa reakcji na ogień A1).

Dotychczasowe badania potwierdzają, że parametry fizykochemiczne SWM, takie jak gęstość objętościowa, grubość izolacji, skład mineralny oraz orientacja włókien, mają istotny wpływ na jej zdolność do izolowania temperatury pożarowej [2 – 5]. Andersen i Dyrboel [2] podkreślają znaczenie promieniowania wewnętrznego w materiałach włóknistych, podczas gdy Karamanos i in. [3] wskazują na zależność przewodnictwa cieplnego od struktury mikroporów. Krasnovskich i in. [4], a także Grinchuk [5], analizowali stabilność termiczną SWM oraz przewodność cieplną w warunkach wysokotemperaturowych.

Modelowanie przewodnictwa i promieniowania cieplnego w SWM rozwijane jest w kontekście obliczeń inżynierskich. Veisheh i Hakkaki-Fard [6] przedstawili numeryczne podejście do opisu sprzężonego przewodnictwa i promieniowania, natomiast Paudel i in. [7] zaprezentowali model wielofizyczny do przewidywania odporności ogniowej elementów z izolacją z SWM.

W literaturze krajowej pojawiają się również prace eksperymentalne dotyczące właściwości ogniowych SWM. W badaniach opisanych w [8] oceniono wpływ gęstości i grubości SWM na zdolność do ograniczenia przenikania temperatury wynikającej z oddziaływania standardowego pożaru. Należy zauważyć, że analizy te odnosiły się przede wszystkim do izolacji jako osobnego elementu bez uwzględnienia wpływu rury stalowej przewodzącej ciepło.

Pomimo dużego zakresu badań nad charakterystyką SWM w warunkach pożaru, w literaturze naukowej brakuje szczegółowych danych odnoszących się do zachowania rur stalowych izolowanych SWM w kontekście rzeczywistego przejścia przez przegrodę, np. na granicy stref pożarowych. Istniejące publikacje dotyczące uszczelnień przejść instalacyjnych mają zazwyczaj charakter przeglądowy i opisują przede wszystkim skuteczność poszczególnych rozwiązań, np. opasek pęczniących, materiałów uszczelniających lub zachowania samej przegrody [9 – 10]. Konfiguracja: rura stalowa + wełna mineralna + przegroda pozostaje słabo rozpoznana. W związku z tym, w ramach artykułu przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących odporności ogniowej przejść instalacyjnych stalowych rur o różnej średnicy i tej samej grubości ścianki, zabezpieczonych izolacją z wełny mineralnej o gęstości większej niż przebadana i zaprezentowana w pracy [1].

Materiały i metody badania

W ramach badania odporności ogniowej, w ścianie wykonanej z autoklawizowanego betonu komórkowego o grubości 180 mm i gęstości 600 kg/m³ wykonano 43 uszczelnienia przejść instalacyjnych rur o sześciu różnych średnicach i różnej grubości ścianki. W artykule analizie poddano wyniki trzech średnic (łącznie 30 rur), które charakteryzowały się jednakową grubością ścianki i wymiarami (średnica × grubość ścianki):

- $\varnothing 60,3 \times 3,6$ mm – 12 szt.;
- $\varnothing 114,3 \times 3,6$ mm – 10 szt.;
- $\varnothing 168,3 \times 3,6$ mm – 8 szt.

The pipes were protected with two types of rock mineral wool. For each diameter, one of the pipes was protected with insulation, tested within the scope of the study [1], designated as MW Type A, with a declared density of 37 kg/m^3 , which was confirmed by verifying measurements in the laboratory, while the remaining pipes, designated as MW Type B, were protected using mineral wool with a declared density of 50 kg/m^3 , also confirmed by in-house testing. The insulation was installed symmetrically, on both sides of the bulkhead. The exact dimensions of the insulation of the pipe in question are shown in Table 1, in the subsection on test results. In the case of the wool designated MW Type A, the dimensions were selected based on the formulae described in [1]. In the case of the 168.3 mm diameter pipe, due to the non-availability of mineral wool of the thickness resulting from the analytical calculation (60 mm) on the market, 40 mm thick wool was used. All pipes were sealed on the furnace side by a welded steel plate. The specimens before testing are shown in the photograph.

The test pieces were heated in the test furnace according to the standard temperature-time curve defined by equation (1), reflecting a fully developed fire inside the building (Figure 1).

Rury zabezpieczone zostały dwoma rodzajami skalnej wełny mineralnej. W przypadku każdej średnicy jedna z rur zabezpieczona była izolacją, przebadaną w ramach opracowania [1], oznaczoną jako MW Typ A, o deklarowanej gęstości 37 kg/m^3 , która została potwierdzona weryfikującymi pomiarami w laboratorium, natomiast pozostałe rury oznaczone jako MW Typ B, zabezpieczono przy użyciu wełny mineralnej o deklarowanej gęstości 50 kg/m^3 , również potwierdzonej badaniami własnymi. Izolacja zamontowana była symetrycznie, po obu stronach przegrody. Dokładne wymiary izolacji danej rury przedstawiono w tabeli 1, w podpunkcie dotyczącym wyników badania. W przypadku wełny oznaczonej jako MW Typ A wymiary dobrane zostały na podstawie wzorów opisanych w [1]. W przypadku rury o średnicy 168,3 mm, ze względu na brak dostępności na rynku wełny mineralnej o grubości wynikającej z obliczeń analitycznych (60 mm), zastosowano wełnę o grubości 40 mm. Wszystkie rury były zamknięte po stronie pieca przez dospawaną blachę stalową. Próbkę przed badaniem przedstawiono na fotografii.

Elementy próbne nagrzewane były w piecu badawczym wg standardowej krzywej temperatura-czas określonej wzorem (1), odzwierciedlającej w pełni rozwinięty pożar wewnątrz budynku (rysunek 1).

Table 1. Fire insulation results for MW Type A wool

Tabela 1. Wyniki izolacyjności ogniowej w przypadku wełny MW Typ A

Pipe diameter × wall thickness / (Type/ thickness × insulation length MW)/Średnica × grubość ścianki rury/ (typ/grubość × długość izolacji MW)	Temperature rise recorded during the test (T_p – maximum temperature on the pipe at a given time); T_{mw} – maximum temperature on the mineral wool at a given time [K]/Przyrost temperatury zarejestrowany podczas badania (T_p – maksymalna temperatura na rurze w danym czasie; T_{mw} – maksymalna temperatura na wełnie mineralnej w danym czasie) [K]												Class/ Klasa
	T_p (30)	T_{mw} (30)	T_p (60)	T_{mw} (60)	T_p (90)	T_{mw} (90)	T_p (120)	T_{mw} (120)	T_p (180)	T_{mw} (180)	T_p (240)	T_{mw} (240)	
ø60,3 × 3,6/ (MW Type A/20 × 120)	31,8	11,7	64,7	30,7	90,2	45,8	110,6	59,7	134,4	82,9	149,5	99,5	EI 240
ø114,3 × 3,6/ (MW Type A/50 × 610)	39,6	29,5	75,2	75	100,6	75,4	121,7	75,7	149,1	137,3	166	174,2	EI 240
ø168,3 × 3,6/ (MW Type A/40 × 1150)	67,5	61,1	104	70,9	125,1	74,3	139,4	135,8	154,6	195,2	164,1	227,3	EI 120

Results below the limit temperature are marked in green, and results above this temperature are marked in red, T_p – temperature increase on the pipe surface at a given time specified in brackets; T_{mw} – temperature increase on the surface of mineral wool at a given time specified in brackets)/Oznaczenia: kolor zielony – wyniki poniżej temperatury granicznej; kolor czerwony – wyniki powyżej temperatury granicznej; T_p – przyrost temperatury na powierzchni rury w czasie podanym w nawiasach; T_{mw} – przyrost temperatury na powierzchni wełny mineralnej w czasie podanym w nawiasach



The test specimen before fire resistance testing: a) unheated surface; b) heated surface

Element próbny przed badaniem odporności ogniowej: a) powierzchnia nienagrzewana; b) powierzchnia nagrzewana

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

where:

T – average furnace temperature [°C];

t – time [min].

During the test, airtightness and fire insulation were verified. The airtightness was verified visually and using a cotton swab and joint gauges. Loss of fire tightness occurs when a flame of more than 10 s duration appears on the unheated surface, when the cotton swab applied to the surface of the test specimen is ignited, and when point penetration of the test specimen is possible with a 25 mm diameter gauge or penetration over 100 mm with a 6 mm diameter gauge. Fire performance was verified using thermocouples mounted on the insulation at a distance of 25 mm from the partition surface and on the pipe at a distance of 25 mm from where the insulation terminates (Figure 2).

Results and discussion

All test elements retained their fire integrity for 240 min. The fire insulation results, determined from thermocouples placed on the mineral wool at a distance of 25 mm from the partition and on the pipe at a distance of 25 mm from the insulation, are summarised in Table 1 (MW Type A mineral wool) and Table 2 (MW Type B mineral wool). Figure 3 shows the temperature on pipes with diameters from 60.3 mm to 168.3 mm protected with mineral wool labelled MW Type B. As in the case of MW Type A wool, the use of different thicknesses and insulation lengths enabled a thorough analysis of the effect of the protection dimensions on the fire performance of the passage seal.

Analysing the results summarised in Table 1, it was found that the expected fire resistance class, i.e. EI 240, was achieved in the case of sealing of installation passages for pipes with diameters of 60.3 mm and 114.3 mm protected with mineral wool of dimensions calculated on the basis of formulas

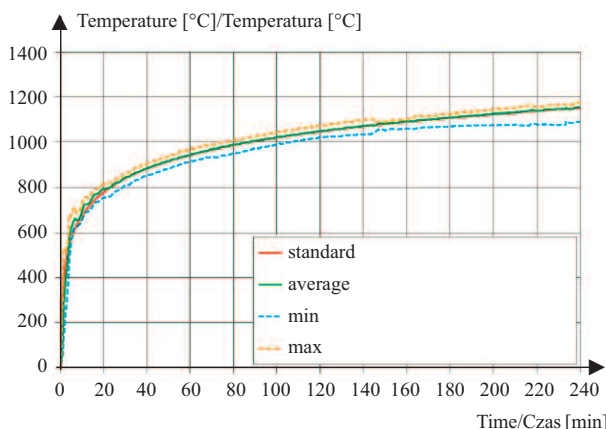


Fig. 1. Heating curve of test samples

Rys. 1. Wykres nagrzewania elementów próbnych

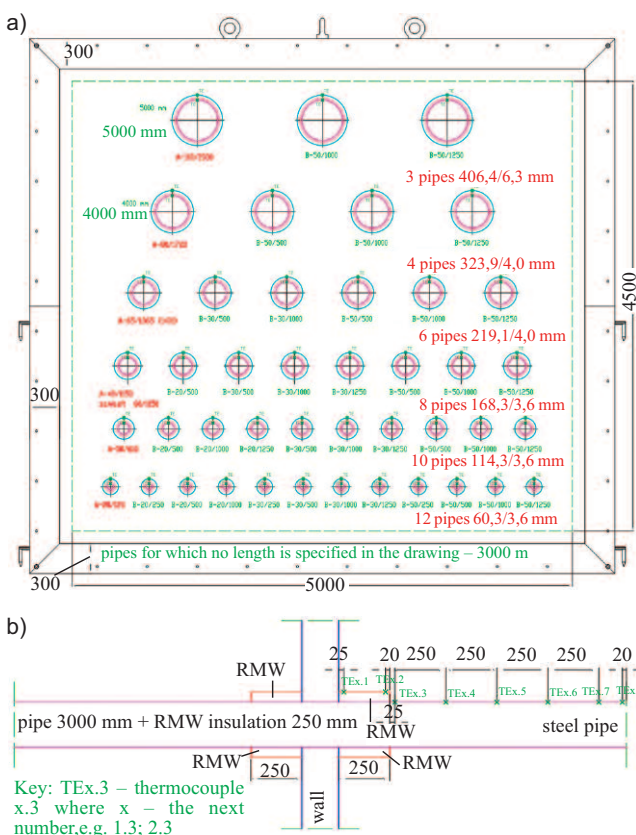


Fig. 2. Pipe layout (a) and thermocouple mounting locations (b)

Rys. 2. Rozkład rur (a) i miejsca mocowania termoelementów (b)

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

gdzie:

T – średnia temperatura w piecu [°C];

t – czas [min].

Podczas badania weryfikowana była szczelność oraz izolacyjność ogniowa. Szczelność weryfikowano wizualnie oraz przy użyciu tamponu bawełnianego i szczelinomierzy. Utrata szczelności ogniowej następuje po pojawieniu się, na nienagrzewanej powierzchni, płomienia trwającego dłużej niż 10 s, w momencie, gdy przyłożony do powierzchni elementu próbnego tampon bawełniany ulegnie zapłonowi oraz w przypadku, gdy możliwa jest punktowa penetracja elementu próbnego szczelinomierzem o średnicy 25 mm lub penetracja na długości powyżej 100 mm szczelinomierzem o średnicy 6 mm. Izolacyjność ogniowa weryfikowana była przy użyciu termoelementów zamontowanych na izolacji w odległości 25 mm od powierzchni przegrody oraz na rurze w odległości 25 mm od miejsca zakończenia izolacji (rysunek 2).

Wyniki i dyskusja

Wszystkie elementy próbne zachowały szczelność ogniową przez 240 min. Wyniki izolacyjności ogniowej, określone na podstawie termoelementów umieszczonych na wełnie mineralnej w odległości 25 mm od przegrody oraz na rurze w odległości 25 mm od izolacji zostały zestawione w tabeli 1 (wełna mineralna typu MW Typ A) oraz w tabeli 2 (wełna mineralna typu MW Typ B). Na rysunku 3 przedstawiono temperaturę na rurach o średnicy od 60,3 mm do 168,3 mm zabezpieczonych wełną mineralną oznaczoną jako MW Typ B. Podobnie jak w przypadku wełny MW Typ A zastosowanie różnej grubości oraz długości izolacji umożliwiło przeprowadzenie dokładnej analizy wpływu wymiarów zabezpieczenia na właściwości ogniowe uszczelnienia przejścia.

Analizując wyniki zestawione w tabeli 1, stwierdzono, że w przypadku uszczelnień przejść instalacyjnych rur o średnicy 60,3 mm oraz 114,3 mm zabezpieczonych wełną mineralną o wymiarach wyliczonych na podstawie wzorów opracowanych w ramach publikacji [1] osiągnięto oczekiwaną klasę od-

Table 2. Fire insulation results for MW Type B wool

Tabela 2. Wyniki izolacyjności ogniowej w przypadku wełny MW Typ B

Diameter × pipe wall thickness/ (type/thickness × insulation length MW)/Średnica × grubość ścianki rury/(typ/grubość × długość izolacji MW)	Temperature rise recorded during the test (T_p – maximum temperature on the pipe at a given time); T_{mw} – maximum temperature on the mineral wool at a given time) [K]/Przyrost temperatury zarejestrowany podczas badania (T_p – maksymalna temperatura na rurze w danym czasie), T_{mw} – maksymalna temperatura na wełnie mineralnej w danym czasie) [K]												Class/ Klasa
	T_p (30)	T_{mw} (30)	T_p (60)	T_{mw} (60)	T_p (90)	T_{mw} (90)	T_p (120)	T_{mw} (120)	T_p (180)	T_{mw} (180)	T_p (240)	T_{mw} (240)	
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 250)	13,1	30,0	37,5	67,6	58,3	70,7	76,6	74,9	97,2	124,0	109,1	148,8	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 500)	3,0	19,5	12,8	52,0	25,3	61,6	36,8	81,2	49,9	116,3	56,4	143,0	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 1000)	0,7	39,2	2,5	63,1	5,4	64,1	9,2	75,6	14,9	128,9	17,8	153,2	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 250)	11,0	12,8	32,3	47,4	52,2	58,2	70,0	61,7	91,8	85,3	105,4	113,3	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 500)	2,0	12,5	11,6	67,1	24,0	70,6	36,0	71,6	51,0	81,1	59,6	108,6	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 1000)	0,7	7,3	2,2	49,1	4,7	56,2	8,3	60,7	14,1	93,6	17,9	121,0	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 1250)	0,7	21,3	1,8	50,1	3,7	57,7	5,7	62,3	8,9	89,5	10,9	112,6	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 250)	8,8	4,1	29,3	62,0	46,3	66,2	63,6	64,5	91,0	63,3	108,8	61,6	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 500)	1,4	30,0	8,3	51,6	19,1	54,3	31,2	55,1	50,9	75,0	63,6	106,5	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 1000)	0,5	14,4	1,6	48,0	3,4	57,1	6,3	58,6	12,6	60,9	17,7	96,1	EI 240
ø60,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 1250)	0,4	2,1	1,2	56,4	2,3	60,4	3,9	60,0	7,4	58,7	10,6	64,1	EI 240
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 500)	54,6	52,1	94,0	66,5	123,0	122,0	144,2	168,0	166,0	232,6	179,0	269,3	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 1000)	19,9	51,4	45,8	68,9	65,7	94,2	79,8	159,1	92,5	244,8	99,6	285,5	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 1250)	13,2	53,7	33,7	64,1	49,3	123,0	60,3	172,8	70,0	236,8	75,5	276,8	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 500)	53,1	42,6	94,4	61,1	124,4	88,6	147,0	133,4	172,2	185,0	189,5	219,4	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 1000)	18,0	18,6	43,7	53,1	65,0	93,4	80,1	139,1	95,0	191,9	103,9	224,9	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/30 × 1250)	5,5	14,4	18,5	46,4	30,2	79,2	40,7	127,1	52,0	183,9	57,8	215,8	EI 120
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 500)	46,1	13,3	82,4	48,4	110,6	64,8	136,9	70,0	172,0	128,5	193,1	155,1	EI 180
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 1000)	11,9	6,2	33,7	54,6	53,6	59,5	71,5	69,6	95,1	115,3	108,3	141,6	EI 240
ø114,3 × 3,6/(MW Typ B/50 × 1250)	3,2	23,3	15,9	62,7	31,3	64,7	46,1	66,6	67,8	119,4	79,3	147,2	EI 240
ø168,3 × 3,6/(MW Typ B/20 × 500)	122,5	62,4	173,8	78,7	204,5	152,8	224,1	194,0	243,5	244,2	258,2	275,6	EI 60
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/30 × 500)	124,1	56,8	176,2	77,1	206,2	144,4	226,4	183,5	248,7	234,1	265,4	262,3	EI 60
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/30 × 1000)	72,8	65,8	120,4	73,0	147,7	109,8	166,5	170,0	183,4	228,3	194,2	259,6	EI 120
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/30 × 1250)	47,7	43,6	93,4	64,7	118,0	102,2	135,8	156,8	148,2	215,2	155,4	244,4	EI 120
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/50 × 500)	123,4	53,2	175,6	57,6	203,1	63,7	224,5	67,7	252,7	109,6	271,0	132,2	EI 60
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/50 × 1000)	65,1	39,2	108,7	57,5	134,7	59,1	154,3	69,9	178,3	127,4	191,1	149,1	EI 180
ø168,3 × 3,6/(MW Typ A/50 × 1250)	40,0	44,1	81,7	52,2	105,0	55,6	123,6	71,6	143,1	130,2	152,3	159,6	EI 240

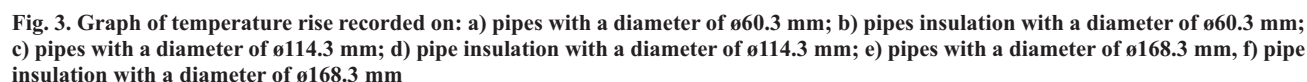
Results below the limit temperature are marked in green, and results above the limit temperature are marked in red; T_p – temperature increase on the pipe surface at a given time specified in brackets; T_{mw} – temperature increase on the surface of mineral wool at a given time specified in brackets)/Oznaczenia: kolor zielony – wyniki poniżej temperatury granicznej; kolor czerwony – wyniki powyżej temperatury granicznej; T_p – przyrost temperatury na powierzchni rury w czasie podanym w nawiasach; T_{mw} – przyrost temperatury na powierzchni wełny mineralnej w czasie podanym w nawiasach

developed within the framework of publication [1]. In the case of a pipe with a diameter of 168.3 mm, it was not possible to use mineral wool of appropriate thickness due to material shortages (40 mm was used for cities of the calculated 60 mm). The fire resistance class of this solution was EI 120, with the temperature exceeding the test temperature for the entire test period (240 min) occurring only on the mineral wool. The temperature on the pipe was not exceeded, and therefore, according to the assumptions made in the referenced study, the length of the mineral wool must be considered to have been correctly calculated.

In the case of sealing pipe penetrations protected with mineral wool labelled as MW Type B (with a declared density of 50 kg/m³), the highest fire resistance class (EI 240) found in Polish building regulations was achieved with each diameter. In the case of pipes with a diameter of 60.3 mm, a wool thickness of 20 mm and a length of 250 mm was sufficient (similarly to the use of mineral wool designated as MW Type A), and for

porności ogniowej, tj. EI 240. W przypadku rury o średnicy 168,3 mm, ze względu na braki materiałowe, nie udało się zastosować wełny mineralnej o odpowiedniej grubości (zastosowano 40 mm zamiast wyliczonych 60 mm). Klasa odporności ogniowej w przypadku tego rozwiązania wyniosła EI 120, przy czym przekroczenie temperatury przez cały okres badania (240 min) wystąpiło tylko na wełnie mineralnej. Temperatura na rurze nie została przekroczona, a co za tym idzie zgodnie z założeniami przyjętymi w przywołanej pracy należy uznać, że długość wełny mineralnej została właściwie wyliczona.

W przypadku uszczelnień przejść rur zabezpieczonych wełną mineralną oznaczoną jako MW Typ B (o deklarowanej gęstości 50 kg/m³), przy każdej ze średnic udało się osiągnąć największą z występujących w polskich przepisach budowlanych klasę odporności ogniowej (EI 240). W przypadku rur o średnicy 60,3 mm, wystarczające było zastosowanie wełny o grubości 20 mm i długości 250 mm (podobnie jak przy zastosowaniu wełny mineralnej oznaczonej jako MW Typ A), a rur o śred-

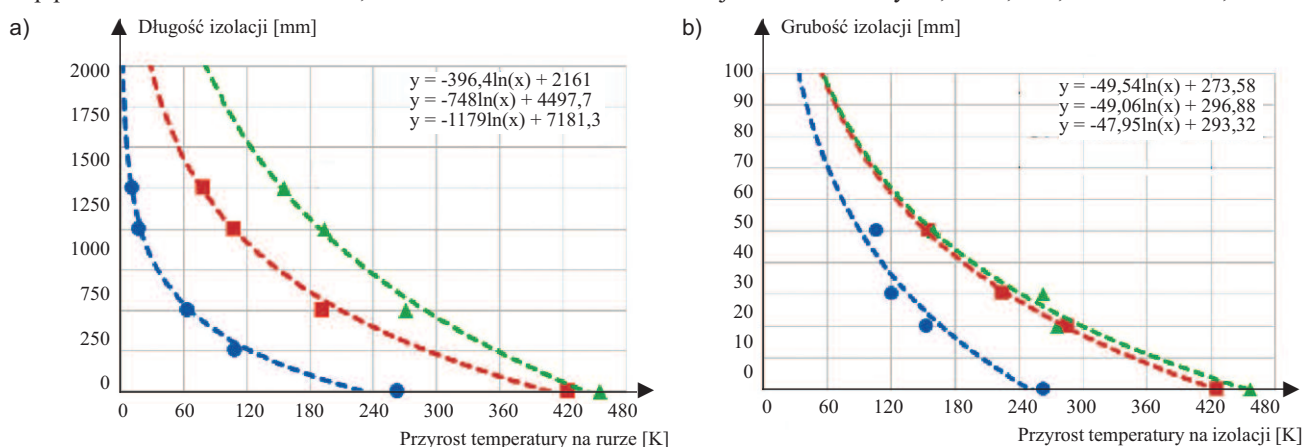


pipes with a diameter of 114.3 mm, a wool thickness of 50 mm and a length of 1,000 mm (250 mm shorter than MW Type A wool) proved sufficient to provide four hours of fire tightness and insulation. In the case of pipes with a diameter of 168.3 mm, a 50 mm thick wool with a length of 1,250 mm was required to achieve the class referred to (only an EI 180/E 240 class could be achieved with MW Type A wool). Figure 4 shows

nicy 114,3 mm wystarczająca do zabezpieczenia na cztery godziny szczelności i izolacyjności ogniowej okazała się wełna o grubości 50 mm i długości 1000 mm (o 250 mm krótsza niż wełna MW Typ A). W przypadku rur o średnicy 168,3 mm do osiągnięcia przywołanej klasy konieczne było zastosowanie wełny o grubości 50 mm i długości 1250 mm (przy zastosowaniu wełny MW Typ A udało się osiągnąć jedynie klasę EI 180/E 240).

graphs of the temperature rise recorded by the thermocouples placed on the pipe and on the insulation in the case of seals for pipe penetrations with diameters of 60.3 mm, 114.3 mm and 168.3 mm. As in the case of the tests carried out in the first part of the work [1], it was observed that the temperature recorded on the pipe is mainly influenced by the length of the mineral wool, while in the case of the insulation, the thickness of the insulation has a decisive influence.

In the case of insulation labelled MW Type B, curves of the maximum temperature recorded up to 240 minutes of the test on a given pipe and its insulation were also developed as a function of the length of mineral wool used and its thickness. The curves determined in Figure 4a are described by formulae (2), (3) and (4), while those determined in Figure 4b are described by formulae (5), (6) and (7). In both cases, the formulae apply successively to pipes with diameters of 60.3 mm, 114.3 mm and 168.3 mm.



Oznaczenia: kolor niebieski – rura o średnicy 60,3 mm; kolor czerwony – rura o średnicy 114,3 mm; kolor zielony – rura o średnicy 168,3 mm

Fig. 4. Graph of maximum temperature increase in 240 minutes of testing depending on insulation dimensions: a) temperature on the pipe depending on insulation length; b) temperature on mineral wool depending on insulation thickness

Rys. 4. Wykres maksymalnego przyrostu temperatury w 240 minucie badania w zależności od wymiarów izolacji: a) temperatura na rurze w zależności od długości izolacji; b) temperatura na wełnie mineralnej w zależności od grubości izolacji

$$L = -394,40 \ln(T) + 2161,00 \quad (2)$$

$$L = -748,40 \ln(T) + 4497,70 \quad (3)$$

$$L = -1179 \ln(T) + 7181,30 \quad (4)$$

$$g = -49,54 \ln(T) + 273,58 \quad (5)$$

$$g = -49,06 \ln(T) + 296,88 \quad (6)$$

$$g = -47,95 \ln(T) + 293,32 \quad (7)$$

where:

T – maximum temperature rise at a given measurement point;

L – insulation length; g – insulation thickness.

$$L = -394,40 \ln(T) + 2161,00 \quad (2)$$

$$L = -748,40 \ln(T) + 4497,70 \quad (3)$$

$$L = -1179 \ln(T) + 7181,30 \quad (4)$$

$$g = -49,54 \ln(T) + 273,58 \quad (5)$$

$$g = -49,06 \ln(T) + 296,88 \quad (6)$$

$$g = -47,95 \ln(T) + 293,32 \quad (7)$$

gdzie:

T – maksymalny przyrost temperatury w danym miejscu pomiarowym;

L – długość izolacji; g – grubość izolacji.

By substituting the criterion value of the temperature rise (180 K) into equations 2 ÷ 7, the minimum insulation dimensions required for a given penetration seal to maintain the fire resistance class EI 240 can be determined as (thickness × length):

- 102.5 × 16.0 mm for pipes with a diameter of 60.3 mm and a wall thickness of 3.6 mm;

- 613.5 × 42.0 mm for tubes with a diameter of 114.3 mm and a wall thickness of 3.6 mm;

- 1059.0 × 44.5 mm for tubes with a diameter of 168.3 mm and a wall thickness of 3.6 mm.

Podstawiając do wzorów 2 ÷ 7 kryterialną wartość przyrostu temperatury (180 K), można wyznaczyć minimalne wymiary izolacji wymagane do zachowania klasy odporności ogniowej EI 240 przez dane uszczelnienie przejścia, wynoszące (grubość × długość):

- 102,5 × 16,0 mm w przypadku rur o średnicy 60,3 mm i grubości ścianki 3,6 mm;

- 613,5 × 42,0 mm w przypadku rur o średnicy 114,3 mm i grubości ścianki 3,6 mm;

- 1059,0 × 44,5 mm w przypadku rur o średnicy 168,3 mm i grubości ścianki 3,6 mm.

Conclusions

In this study, 30 seals were tested for steel pipe penetrations with three different diameters (from 60.3 mm to 168.3 mm) and the same wall thickness (3.6 mm) protected by two types of rock mineral wool (MW Type A and MW Type B) with different dimensions. In the case of Type A wool, the insulation dimensions were selected based on the work [1]. All the components tested were installed in a 180 mm thick cellular concrete wall.

It was concluded from the test results that the use of mineral wool with a higher density makes it possible to achieve a higher fire resistance class of the penetration seal. In most of the cases tested, the use of mineral wool type B with a density of 50 kg/m³ increased the fire resistance class of the penetration seal in comparison with a 37 kg/m³ type A wool solution of the same dimensions.

The results obtained with type B wool, which has a higher density, confirm the conclusions presented in the paper [1], in which it was shown that the fire insulation performance of steel pipe penetrations protected with mineral wool of a given type depends on the thickness and length of the insulation used. It has been confirmed that the temperature recorded on the pipe depends primarily on the length of the insulation, while in the case of the temperature on the surface of the insulation, the thickness of the mineral wool has a decisive influence on its value.

For type B wool, as for type A wool, formulas have been derived to estimate the minimum required insulation dimensions to achieve fire resistance class EI 240 by sealing pipe penetrations with a diameter of up to 168.3 mm and a wall thickness of not less than 3.6 mm. These formulae only apply to sealing of penetrations in rigid vertical partitions with a density of not less than 600 kg/m³ and a thickness of not less than 180 mm, where the steel pipes have been protected using a specific type of mineral wool of the indicated density.

Planned further research work on insulation with even higher densities than those investigated so far will be designed to enable correlations to be determined as a function of the change in mineral wool density, rather than just its length and thickness.

Received: 07.04.2025
Revised: 05.05.2025
Published: 23.07.2025

Literature

- [1] Sędlak B, Sulik P. Wpływ wymiarów izolacji z wełny mineralnej na odporność ogniową uszczelnień przejść stalowych rur przez pionowe przegrody przeciwpożarowe. *Materiały Budowlane*. 2024. DOI: 10.15199/33.2024.01.03.
- [2] Andersen FMB, Dyrboel S. Modelling radiative heat transfer in fibrous materials. *JQSRT*, vol. 60, 1998.
- [3] Karamanos A et al. Heat transfer in fibrous insulating materials. *Proc. IASME/WSEAS*, 2004.
- [4] Krasnovskikh MP et al. Thermal stability of mineral-wool materials. *Russ J Appl Chem*, vol. 87, 2014.
- [5] Grinchuk PS. Contact heat conductivity at high temperatures. *J Eng Phys Thermophys*, vol. 87, 2014.

Wnioski

W ramach pracy przeprowadzono badanie trzydziestu uszczelnień przejść stalowych rur o trzech różnych średnicach (od 60,3 mm do 168,3 mm) i takiej samej grubości ścianki (3,6 mm) zabezpieczonych dwoma rodzajami skalnej wełny mineralnej (MW Typ A oraz MW Typ B) o różnych wymiarach. W przypadku wełny typu A wymiary izolacji dobrane zostały na podstawie pracy [1]. Wszystkie badane elementy zamontowane były w ścianie z betonu komórkowego o grubości 180 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że zastosowanie wełny mineralnej o większej gęstości umożliwia osiągnięcie wyższej klasy odporności ogniowej uszczelnienia przejścia. W większości przebadanych przypadków zastosowanie wełny typu B o gęstości 50 kg/m³ podniosło klasę odporności ogniowej uszczelnienia przejścia w porównaniu z rozwiązaniem z wełną typu A o gęstości 37 kg/m³ i o takich samych wymiarach.

Uzyskane wyniki dotyczące wełny typu B, o większej gęstości niż wełna typu A, potwierdzają wnioski przedstawione w pracy [1], w której wykazano, że izolacyjność ogniowa uszczelnień przejść rur stalowych, zabezpieczonych wełną mineralną danego typu, zależy od grubości oraz długości zastosowanej izolacji. Potwierdzono, że temperatura zarejestrowana na rurze zależy przede wszystkim od długości izolacji, natomiast w przypadku temperatury na powierzchni izolacji decydujący wpływ na jej wartość ma grubość wełny mineralnej.

W przypadku wełny typu B, podobnie jak wełny typu A, wprowadzone zostały wzory umożliwiające oszacowanie minimalnych wymaganych wymiarów izolacji w celu osiągnięcia klasy odporności ogniowej EI 240 przez uszczelnienia przejść rur o średnicy do 168,3 mm i grubości ścianki nie mniejszej niż 3,6 mm. Przywołane wzory mają zastosowanie wyłącznie do uszczelnień przejść w sztywnych pionowych przegrodach o gęstości nie mniejszej niż 600 kg/m³ i grubości nie mniejszej niż 180 mm, w których stalowe rury zostały zabezpieczone przy użyciu konkretnego typu wełny mineralnej o wskazanej gęstości.

Planowane dalsze prace badawcze dotyczące izolacji o jeszcze większej gęstości niż dotychczas badana będą miały za zadanie umożliwić wyznaczenie korelacji w zależności od zmiany gęstości wełny mineralnej, a nie tylko od jej długości i grubości.

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.05.2025 r.
Opublikowano: 23.07.2025 r.

- [6] Veisheh S, Hakkaki-Fard A. Combined radiation and conduction in mineral wool. *Heat Transf Eng*, vol. 30, 2009.
- [7] Paudel D et al. Multiphysics Modelling of Stone Wool Fire Resistance. *Fire Technology*, 2020.
- [8] Sulik P, Śmigielski N. Zdolność izolowania temperatur pożarowych w zależności od gęstości i grubości wełny mineralnej. *Izolacje*. 2021; vol. 11/12.
- [9] Fejfer Ł, Sulik P. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego przejść instalacyjnych. *Materiały Budowlane*. 2018.
- [10] Sędlak B, Sulik P, Izydorczyk D, Łukowski M. Fire-stop Wraps and Collars with Intumescent Materials-Performance Comparison, in *Procedia Engineering*. 2017; doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.113.