

dr inż. Ewa Sudol^{1)*}

ORCID: 0000-0003-2902-0497

dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. ITB¹⁾

ORCID 0000-0003-0988-4511

mgr inż. Aleksandra Mazurek¹⁾

ORCID 0000-0002-7027-9612

dr inż. Ewelina Kozikowska¹⁾

ORCID 0000-0001-7323-3663

Multi-criteria analysis of the resistance of ETICS with fire barriers to environmental factors

Wielokryterialna analiza odporności ETICS z barierami ogniowymi na czynniki środowiskowe

DOI: 10.15199/33.2025.08.07

Abstract: Long-lasting exposure was simulated on a thermal insulation model based on expanded polystyrene with a mineral wool strip. The second exposure sequence caused the top layer cracking. The crack width in the barrier area exceeded 0.2 mm, suggesting a loss of watertightness. 3D scanning and inspection analysis was used for deformation assessment. It revealed deformation within the mineral wool strip. A decrease in the top layer adhesion to the thermal insulation material was reported.

Keywords: thermal insulation; fire barrier; impact; 3D scanning; performance

Streszczenie: Model ocieplenia na bazie ekspandowanego polistyrenu z pasem wełny mineralnej poddano długotrwałej ekspozycji. Druga sekwencja oddziaływań skutkowałą pęknięciami warstwy wierzchniej. W obszarze bariery przekroczyły one szerokość 0,2 mm, co wskazuje na utratę wodoszczelności. Do oceny deformacji zastosowano skanowanie 3D z analizą inspekcyjną. Uwidoczniło ono deformację w obrębie pasa wełny mineralnej. Odnotowano zmniejszenie przyczepności warstwy wierzchniej do materiału termoizolacyjnego.

Słowa kluczowe: ocieplenie; bariery ogniowe; oddziaływania; skanowanie 3D; właściwości użytkowe

External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) are among the most popular methods of providing adequate thermal insulation of walls [1]. Every year, 120–130 m² are thermally insulated in Central and Eastern Europe. This makes up over half of the European volume [2]. Poland holds a dominant position with 40 million m² annually [3].

ETICS consists of thermal insulation material fixed directly to the substrate and the top layer made on site, with no air void or intermediate layers. In standard ETICS, the top layer is a reinforced layer composed of rendering with a glass fibre mesh and thin-coat plaster, which may or may not be coated with paint. ETICS can be used on masonry and concrete walls as well as timber-frame structures [4]. The most popular thermal insulation materials used (essentially alternatively) in the ETICS in Poland include expanded polystyrene (EPS) and mineral wool (MW) [1, 5]. According to EAD 040083–00–0404 [6], various thermal insulation materials are not allowed in one ETICS. None of the several hundred European Technical Assessments (ETA) issued so far for ETIC covers a system combining various thermal insulation materials [3]. Nevertheless, some countries introduced recommendations to use non-flammable mineral wool strips between windows, in EPS-based ETICS. EPS is typically classified as a self-extinguishing flammable material. The strips shall serve as a fire barrier, preventing fire from spreading to other floors of the building. They are placed be-

łożone systemy ociepleniowe (External Thermal Insulation Composite Systems – ETICS) są jedną z najbardziej popularnych metod zapewnienia odpowiedniej izolacyjności termicznej ścian [1]. W Europie Środkowo-Wschodniej ociepla się rocznie 120–130 mln m², co stanowi ponad połowę europejskiego wolumenu [2], w tym w Polsce 40 mln m² rocznie [3].

System ETICS obejmuje materiał termoizolacyjny zamocowany do podłoża oraz warstwę wierzchnią wykonywaną bezpośrednio na budowie, bez pustki powietrznej lub warstw pośrednich. Warstwa wierzchnia jest warstwą zbrojoną, w skład której wchodzi zaprawa z siatką z włókna szklanego oraz tynk cienkowarstwowy z farbą lub bez. ETICS może być stosowany zarówno na ścianach murowanych, betonowych, jak też o konstrukcji szkieletowej [4]. W Polsce do najpopularniejszych materiałów termoizolacyjnych w systemie ETICS należą ekspandowany polistyren (EPS) oraz wełna mineralna (MW) [1, 5], stosowane alternatywnie. Zgodnie z EAD 040083–00–0404 [6] nie dopuszcza się bowiem użycia różnych materiałów termoizolacyjnych w jednym ETICS. Żadna z kilkuset Europejskich Ocen Technicznych (ETA) wydanych dotychczas na ETICS nie dotyczy systemu łączącego różne materiały termoizolacyjne [3]. Niektóre kraje wprowadziły natomiast zalecenia stosowania w ETICS na bazie EPS, klasyfikowanego przeważnie jako materiał palny samogasnący, pasów międzyokiennych z niepalnej wełny mineralnej. Pasy mają stanowić bariery ogniowe chroniące budynek przed rozprzestrzenianiem ognia na inne kondygnacje. Umieszcza się je między kondygnacjami, na poziomie podłóg,

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej;

^{*)} Correspondence address: e.sudol@itb.pl

tween the storeys, at the floor level, and in some cases above the windows and doors. The first strip should be laid directly above the plinth, another one at the floor level above the first ground storey; the next ones come on successive floor levels, above selected storeys, with or without strips above windows and doors. The solution depends on the arrangement of windows, roofing type, thermal insulation layer thickness and the building's height [7].

The guidelines above were developed with regard to fire safety, neglecting other aspects, including but not limited to thermal insulation's resistance to environmental factors that determines the facade's life. The results of previous studies suggest that an ETICS made with a single thermal insulation material is characterised by high damage resistance, long-lasting functionality and efficiency [8]. ETICS conforming to EAD 040083-00-0404 is believed to maintain its performance characteristics for at least twenty-five years [6]. The differences in the physical and mechanical properties of EPS and MW [10], including thermal conductivity, linear expansion, absorbability and diffusion resistance, can lead to damage in the EPS and MW joining areas. Potential defects include discolouration [10] and cracking of the top layer [11]. They result in the loss of watertightness [12] and, consequently, a loss in thermal insulation usability.

Tests on thermal insulation systems with fire barriers focused on the impact of the strips between the storeys on fire spreading over the façade [13, 14]. The aspect of resistance to weather factors has been rarely considered so far. Norvaisiene et al. [15] exposed a non-standard thermal insulation system containing EPS and MW to heat-rain and heat-cold cycles according to ETAG 004 [16]. After the exposure, no visually noticeable defects were observed in the top layer where acrylic, silicate, silicone and mineral plaster were used. Nevertheless, a 50% adhesion decrease to the thermal insulation material in the EPS and MW contact area was reported. Krause et al. [17] observed no scratches, cracking, blistering, or flaking of the top layer in their tests on similar solutions. In both studies, a standard ETA procedure sequence of hydrothermal cycles was used.

An analysis of climate data carried out by Barreira et al. [18], Kvande et al. [19], and Maia et al. [20] reveals that due to climate change, the facades of buildings, especially western ones, are exposed to environmental impacts much more diversified and intensive than previously assumed. Special attention is paid to the rainfall severity and intensity, as well as an increase in the mean annual temperature and the number of passes through the 0°C threshold, which is critical for the ETICS top layer based on mineral materials.

In light of the analyses above, it seems justified to increase the exposure intensity in accelerated tests when evaluating non-standard solutions that lack data from facility observations. They include EPS-based thermal insulation systems with MW fire barriers. Garecki et al. [21] identified the referenced need in the studies on the impact of the reinforced layer in the EPS-MW contact area in the upper zones of high-rise buildings (>25 m) thermal insulation. Two sequences of hydrothermal cycles were observed to lead to cracking of the top layer when one or two reinforcement mesh layers were used. It should be

a w niektórych przypadkach nad oknami i drzwiami. Pierwszy pas powinien być wykonany bezpośrednio nad cokołem, kolejny na poziomie podłogi nad pierwszą kondygnacją naziemną, a następne na kolejnych poziomach podłogi, nad wybranymi kondygnacjami, z pasami nad oknami i drzwiami lub bez nich, w zależności od rozmieszczenia okien, rodzaju pokrycia dachowego, grubości warstwy izolacji termicznej i wysokości budynku [7].

Wytyczne [7] opracowano ze względu na bezpieczeństwo pożarowe, z pominięciem innych aspektów, w tym odporności ocieplenia na czynniki środowiskowe, która decyduje o trwałości elewacji. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że ETICS wykonany systemowo – z zastosowaniem jednego materiału termoizolacyjnego – cechuje duża odporność na uszkodzenia oraz długotrwała funkcjonalność i efektywność [8]. Zakłada się, że ETICS zgodny z EAD 040083–00–0404 zachowuje swoje właściwości użytkowe przez co najmniej 25 lat [6]. Różnice właściwości fizyko mechanicznych EPS i MW [10], w tym różna przewodność cieplna, rozszerzalność liniowa, nasiąkliwość i opór dyfuzyjny, mogą prowadzić do powstawania uszkodzeń w strefie łączenia EPS i MW. Potencjalne usterki to przebarwienia [10] i pęknięcia warstwy wierzchniej [11], które prowadzą do utraty wodoszczelności [12], a w konsekwencji do utraty parametrów użytkowych ocieplenia.

W badaniach ociepleń z barierami ogniowymi uwagę skoncentrowano przede wszystkim na wpływie pasów międzykondygnacyjnych na rozprzestrzenianie się ognia po elewacji [13, 14]. Aspekt odporności na warunki atmosferyczne był dotychczas rzadko podejmowany. Norvaisiene i in. [15] poddali niesystemowe ocieplenie, łączące EPS i MW, cykлом grzania-deszczowania oraz cykлом grzania-chłodzenia wg ETAG 004 [16]. Po tych oddziaływaniach nie zaobserwowano dostrzegalnych wizualnie defektów warstwy wierzchniej, w której zastosowano tynki akrylowy, silikatowy, silikonowy oraz mineralny. Odnotowano natomiast zmniejszenie o 50% przyczepności tynku do materiału termoizolacyjnego w obszarze styku EPS i MW. Krause i in. [17], w badaniu podobnych rozwiązań, nie odnotowali również rys, pęknięć, pęcherzy czy łuszczenia się warstwy wierzchniej. Należy jednak podkreślić, że w obu pracach zastosowano standardową w przypadku procedur ETA sekwencję cykli hydrotermicznych.

Analiza danych klimatycznych przeprowadzona przez Barreira i in. [18], Kvande i in. [19] oraz Maia i in. [20] wykazuje, że w konsekwencji zmian klimatycznych fasady budynków, przede wszystkim zachodnie, narażone są na znacznie bardziej zróżnicowane i intensywne oddziaływania środowiskowe niż dotychczas przyjmowano. Szczególną uwagę zwraca nasilenie i intensywność opadów, zwiększenie średniej rocznej temperatury i liczby przejść przez próg 0°C, co jest szczególnie istotne w przypadku warstwy wierzchniej w systemie ETICS, wykonywanej z użyciem materiałów mineralnych.

W świetle analiz uzasadnione wydaje się zwiększenie intensywności ekspozycji w testach przyspieszonych, szczególnie gdy ocenie poddawane są rozwiązania niestandardowe, w przypadku których nie ma danych z obserwacji obiektowych. Do takich należą ocieplenia na bazie EPS z barierami z MW. Potrzebę tę dostrzegli Garecki i in. [21] w badaniach wpływu warstwy zbrojonej w strefie styku EPS-MW w gór-

emphasised that only two EPS and MW arrangements and two types of meshing were used in the large-size test model. This resulted in narrowing the observation fields to $0.15 - 0.3 \text{ m}^2$, and hampered reasoning on the thermal insulation behaviour when the continuity of the layers on a large area. Nevertheless, the experimental results suggest a problem with thermal insulation resistance in the EPS-MW contact zone when exposed to environmental factors over an extended period.

This study aimed to identify the behaviour of EPS-based thermal insulation systems with an MW strip introduced as a fire barrier under long-lasting exposure to environmental factors. An extended exposure was used, involving two sequences of hydrothermal and freeze-thaw cycles. The top layer's behaviour was monitored through macro- and microscopic observations. Moreover, the deformation scope and displacement of the ETICS wall top layer were measured. To that end, a new approach was employed, combining 3D scanning with inspection analysis. Additionally, the influence of the set exposure on the top layer adhesion and the impact strength of the thermal insulation system were evaluated.

Materials and methods

The tests were carried out on a thermal insulation system. It was made with EPS-based ETICS covered by a valid ETA. The system was modified by introducing a non-standard MW strip as a fire barrier. The specifications of the materials used to make the model are summarised in Table 1.

A 3.6 m wide and 2.9 m high test model was developed. Thermal insulation was affixed to the substrate, which was a cellular concrete wall supported by a steel structure. The EPS was glued in spots and along the circumference. The fire barriers were manufactured in accordance with the guidelines [7]. The applied strips were 300 mm wide. The dowel spacing was 450 mm (Figure 1a). Mineral wool was glued to the entire surface and then secured with universal facade dowels. The same reinforcement layer, consisting of a single glass fibre mesh and mineral plaster, which is most susceptible to environmental factors, was used throughout the entire model [22, 23].

After twenty-eight days of weathering in laboratory conditions (Photography 1a), the top layer of the model was observed with the naked eye and a portable digital microscope, Delta Optical Smart 5MP PRO, magnification $\times 300$. Then, markers and benchmarks (Photography 1b) were affixed to the model surface and on the steel frame. The markers were used for surface positioning of the scan, and the benchmarks were used to identify the scans in 3D. The markers were applied in a modular primary network every 30 cm, and replenished at the module edges and in its middle to create the target network. The benchmarks were stuck every 60 cm horizontally and vertically.

The first reference imaging was made for the model before the exposure. The thermal insulation top layer with a steel mounting frame was scanned. The frame was used as a set of reference (base) surfaces for positioning the scans in the inspection system. A 3D FreeScan UEPro laser scanner in a photogrammetry mode was used for 3D imaging. The volumetric accuracy of the device in this mode is $0.02 \text{ mm} + 0.015 \text{ mm/m}$. Environmental

nych strefach ocieplenia budynków wysokich ($>25 \text{ m}$). Zauważono, że dwie sekwencje cykli hydrotermicznych prowadzą do pęknięć warstwy wierzchniej, zarówno przy pojedynczej, jak i podwójnej warstwie siatki zbrojącej. Należy jednocześnie podkreślić, że na wielkowymiarowym modelu testowym zastosowano cztery rodzaje tynków – dwa warianty ułożenia EPS i MW oraz dwa rodzaje siatki, co skutkowało zawężeniem pól obserwacyjnych do $0,15 - 0,3 \text{ m}^2$, a tym samym utrudniło wnioskowanie na temat ocieplenia przy zachowaniu ciągłości warstw na dużej powierzchni. Wyniki tego eksperymentu wskazują jednak na problem odporności ocieplenia w strefie styku EPS-MW na długotrwałe działanie czynników środowiskowych.

Praca opisana w artykule miała na celu ocenę zachowania ocieplenia bazującego na EPS, w który wprowadzono pas z MW jako barierę ogniową, w warunkach długotrwałego działania czynników środowiskowych. Zastosowano poszerzoną ekspozycję obejmującą dwie sekwencje cykli hydrotermicznych oraz cykle zamrażania i rozmrażania. Monitorowano zachowanie warstwy wierzchniej makro- i mikroskopowo. Przeprowadzono ponadto pomiary zakresu deformacji oraz przemieszczeń warstwy wierzchniej ściany ETICS z zastosowaniem nowego podejścia polegającego na skanowaniu 3D z analizą inspekcyjną. Oceniono również wpływ zadanych oddziaływań na przyczepność warstwy wierzchniej oraz odporność układu ociepleniowego na uderzenia.

Materiały i metody badań

Przeprowadzono badania układu ociepleniowego wykonanego z zastosowaniem ETICS na bazie EPS, objętego aktualną ETA, który zmodyfikowano przez wprowadzenie niesystemowego pasa z MW, jako bariery ogniowej. Dane materiałów zastosowanych do wykonania modelu zawarto w tabeli 1.

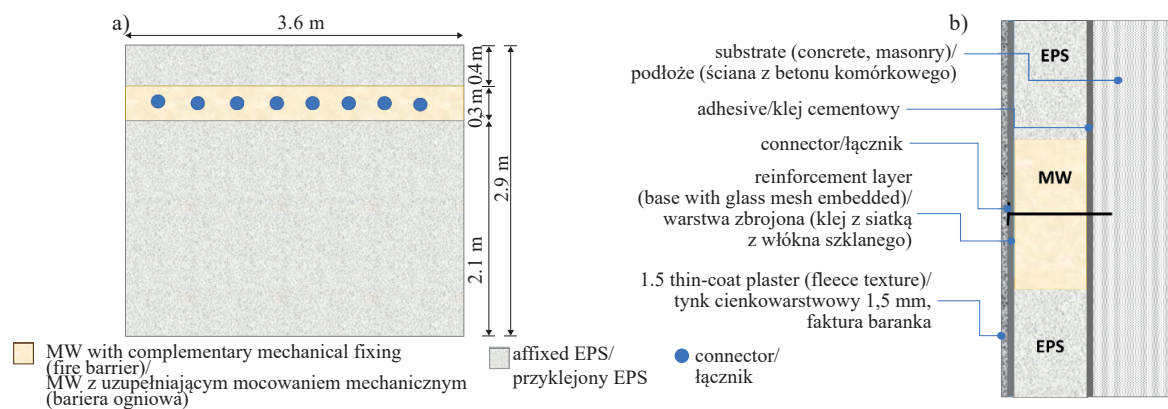
Przygotowano model badawczy o szerokości 3,6 m i wysokości 2,9 m. Termoizolację przyklejono do podłoża, które stanowiła ściana z bloczków z betonu komórkowego osadzona w stalowej konstrukcji wsporczej. EPS klejono techniką obwodowo-punktową. Bariery ogniowe wykonano zgodnie w wytycznymi [7]. Zastosowano pasy o szerokości 300 mm. Rozstaw kołków wynosił 450 mm (rysunek 1a). MW klejono całościowo, a następnie mocowano przy użyciu uniwersalnych kołków fasadowych. W całym modelu zastosowano tę samą warstwę zbrojącą (z pojedynczą warstwą siatki z włókna szklanego) oraz tynk mineralny, jako najbardziej podatny na czynniki środowiskowe [22, 23].

Po 28 dniach sezonowania modelu w warunkach laboratoryjnych (fotografia 1a) wykonano obserwacje warstwy wierzchniej, okiem nieuzbrojonym oraz przy użyciu przenośnego mikroskopu cyfrowego Delta Optical Smart 5MP PRO, przy powiększeniu $300\times$. Następnie na powierzchni modelu oraz na ramie stalowej naklejono markery oraz repery (fotografia 1b). Markery służyły do powierzchniowego pozycjonowania skanu, repery zaś do identyfikacji skanów w wymiarze 3D. Markery naklejono w modułowej siatce bazowej co 30 cm z uzupełnieniem na krawędziach i w środku modułu tworząc siatkę docelową. Repery naklejono co 60 cm w pionie i poziomie.

Table 1. Materials used in the test model

Tabela 1. Materiały użyte do wykonania modelu badawczego

Thermal insulation system/Układ ociepleniowy	
Mortar for fixing the thermal insulation layer to the substrate/ Zaprawa do mocowania termoizolacji do podłoża	Adhesive and filling mineral compound based on cement with a maximum grain size distribution 0.8 mm – dry mixture mixed with water; bulk density 1,520÷1,860 kg/m ³ / mineralna zaprawa klejowo-szpachlowa na bazie cementu o ziarnistości maks. 0,8 mm – wymieszana z wodą sucha mieszanka o gęstości nasypowej 1520÷1860 kg/m ³
Thermal insulation material:/ Materiał termoizolacyjny: base (standard system solution)/ baza (rozwiązanie systemowe)	Expanded polystyrene according to EN 13163:2012+A1:2015, code EPS-EN 13163-T1-L2-W2-S2-P5-BS115-CS (10)70-DS (N) 2-DS (70,-) 2-TR100, declared $\lambda_D = 0.038$ W/mK, 150 mm thick/ polistyren ekspandowany wg EN 13163:2012+A1:2015, kod EPS-EN 13163-T1-L2-W2-S2-P5-BS115-CS (10)70-DS (N) 2-DS (70,-) 2-TR100, o deklarowanej $\lambda_D = 0.038$ W/mK, grubości 150 mm
Strip between the storeys/ Pas międzykondygnacyjny	Rock mineral wool according to EN 13162:2012+A1:2015, code MW-EN 13162-T5-DS (70,90)-CS (10)20-TR10-PL (5)200-WS-WL (P) -MU1, declared $\lambda_D = 0.035$ W/mK, 150 mm thick/ wełna mineralna skalna wg EN 13162:2012+A1:2015, kod MW-EN 13162-T5-DS (70,90)-CS (10)20-TR10-PL (5)200-WS-WL (P) -MU1, o deklarowanej $\lambda_D = 0.035$ W/mK, grubości 150 mm
Mortar for the reinforcement layer/ Zaprawa do wykonywania warstwy zbrojonej	Adhesive and filling mineral compound based on cement with a maximum grain size distribution 0.8 mm – dry mixture mixed with water; bulk density 1,520÷1,860 kg/m ³ / mineralna zaprawa klejowo-szpachlowa na bazie cementu o uziarnieniu maks. 0,8 mm – wymieszana z wodą sucha mieszanka o gęstości nasypowej 1520÷1860 kg/m ³
Reinforcement mesh/Siatka zbrojąca	Glass fibre mesh size 4.5 × 5.0 mm, mass per unit area: 150 g/m ² / siatka z włókna szklanego o wymiarach oczek 4,5×5,0 mm oraz masie powierzchniowej 150 g/m ²
Primer/Grunt	Universal primer for thin-coat mineral plaster (homogenous liquid; bulk density: 1,368 ÷ 1,672 kg/m ³ ; dry matter content: 55.6 ÷ 64.4%)/ uniwersalny podkład gruntujący pod cienkowarstwowe tynki mineralne (ciecz jednorodna o gęstości objętościowej 1368÷1672 kg/m ³ i zawartości substancji suchej 55,6÷64,4%)
Rendering/Wyprawa tynkarska	Structural mineral thin-coat plaster, 1.5 mm grain size distribution, fleece texture – dry mixture mixed with water, uniform colour, no lumps or impurities, bulk density: 1,320 ÷ 1,800 kg/m ³ / mineralny strukturalny tynk cienkowarstwowy o uziarnieniu 1,5 mm i fakturze baranka – wymieszana z wodą sucha mieszanka o jednolitej barwie, bez zbyrleń i zanieczyszczeń, o gęstości nasypowej 1320÷1800 kg/m ³

**Fig. 1. Test model diagram: a) distribution of thermal insulation materials; b) cross-section**

Rys. 1. Schemat modelu badawczego: a) rozmieszczenie materiałów termoizolacyjnych; b) przekrój poprzeczny

conditions were recorded prior to each imaging session. Additionally, the device was calibrated with a benchmark (dedicated plate) using various directions of exposure to the scanner light.

Then, ageing exposure started. It was designed to consider a higher intensity of environmental impacts, covering exposure sequences as outlined in [6]. Each of them consisted of heating and wetting (HW), heating and cooling (HC) and wetting, freezing and thawing (WFT) cycles. The pattern of the environmental exposures is presented in Figure 2. A climatic chamber

Pierwsze, referencyjne obrazowanie wykonano na modelu w stanie wyjściowym. Skanowaniu podlegała warstwa wierzchnia ocieplenia wraz ze stalową ramą montażową. Rama używana była jako zestaw powierzchni bazowych służących pozycjonowaniu poszczególnych skanów w programie inspekcyjnym. Do obrazowania 3D zastosowano laserowy skaner 3D FreeScan UEPro w trybie fotogrametrii. Dokładność urządzenia w tym trybie to 0,02 mm + 0,015 mm/m. Przed każdym obrazowaniem rejestrowano warunki środowiskowe oraz wy-

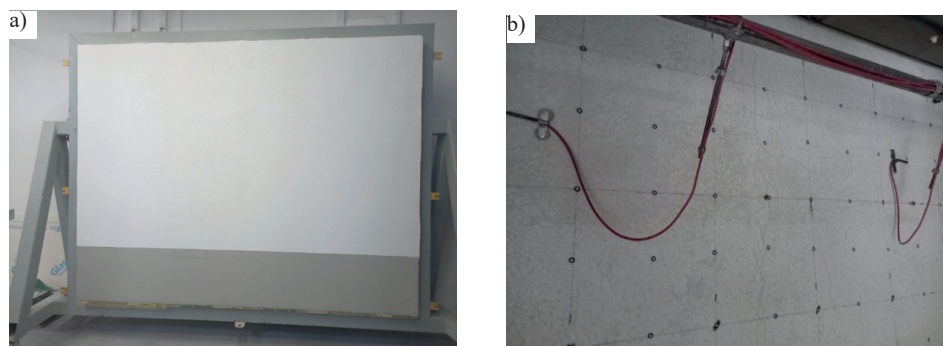


Photo 1. Test mode: a) before; b) after sticking the markers and benchmarks

Fot. 1. Modelu badawczy: a) przed; b) po naklejeniu siatki markerów i reperów

with the function of setting positive and negative temperatures, relative humidity and automated rain, in a continuous operation mode, was employed to execute the exposures.

After each exposure stage, the top layer was observed with the naked eye and a portable digital microscope. The measurement was divided into three packages (A-C). 3D scans were taken after each measurement. The measurement schedule is illustrated as a cause-and-effect flowchart (Figure 3), which shows the pattern of measurements and the method for combining the scans after each exposure series.

The original ETICS 0 item was gradually deformed due to successive exposure packages. Each change in the surface shape resulted in a new identification, i.e. ETICS 1, ETICS 2, and ETICS 3. The reference scan was made before climate exposure started. Operating scans were recorded after each exposure package (Sampling frames 1–3). The final deformation pattern (Inspection 3) was obtained by comparing the reference scan with the operating scan 3 after completing all exposure stages. The intermediate inspections (1, 2, 4, 5, and 6) were used for monitoring the inter-operation processes.

After the exposure ended, the adhesion of the top layer to the thermal insulation material was tested using the pull-off method, as described in [6]. Steel holders (50 x 50 mm) were applied to the top layer, and then the thermal insulation material was incised. The testing rate was constant and amounted to 10 ± 1 mm/min. The force values were recorded until destruction occurred. The stress levels for the maximum force and destruction nature were determined.

Resistance to hard body impact was tested according to ISO 7892:1988 [24]. Steel balls weighing 0.5 kg and 1.0 kg were used. The impact height ranged from 0.61 to 1.02 m. The initial test energy was 3J, and if no damage was ob-

konywano kalibrację urządzenia z użyciem wzornika w postaci dedykowanej płyty, z zastosowaniem różnych kierunków naświetlania skanerem. Następnie rozpoczęto ekspozycję starzeniową, zaprojektowaną z uwzględnieniem zwiększonej intensywności oddziaływań środowiskowych, obejmującą dwie sekwencje oddziaływań wg [6]. Każda z nich składała się z cykli ogrzewania i zwilżania (HW), ocieplania i chłodzenia (HC) oraz zwilżania, zamrażania i rozmrażania (WFT). Schemat cyklu obciążeń środowiskowych przedstawiono na rysunku 2. Do realizacji oddziaływań zastosowano komorę klimatyczną umożliwiającą zadawanie temperatury dodatniej i ujemnej, wilgotności względnej powietrza oraz deszczowania w sposób zautomatyzowany, w trybie pracy ciągłej.

Po każdym etapie oddziaływań prowadzono obserwacje warstwy wierzchniej, okiem nieuzbrojonym oraz przy użyciu przenośnego mikroskopu cyfrowego. Proces pomiarowy podzielono na trzy pakiety (A–C), po których wykonywano skany 3D. Plan pomiarów przedstawiono w formie grafu przyczynowo-skutkowego (rysunek 3). Graf ilustruje zarówno schemat pomiarów, jak i sposób łączenia poszczególnych skanów po każdej serii oddziaływań.

Pierwotny obiekt ETICS 0 podlegał stopniowym deformacjom w wyniku kolejnych pakietów obciążeń. Każda zmiana kształtu powierzchni skutkowała nowym oznaczeniem: ETICS 1, ETICS 2 i ETICS 3. Skan referencyjny wykonano przed rozpoczęciem oddziaływań klimatycznych, natomiast skany operacyjne rejestrowano po każdym pakiecie obciążenia (Operat 1–3).

Końcowy schemat deformacji (Inspekcja 3) uzyskano przez zestawienie skanu referencyjnego z operacyjnym nr 3, po zakończeniu wszystkich etapów obciążenia. Inspekcje pośrednie (nr 1, 2, 4, 5 i 6) służyły do monitorowania przebiegu procesów międzyoperacyjnych.

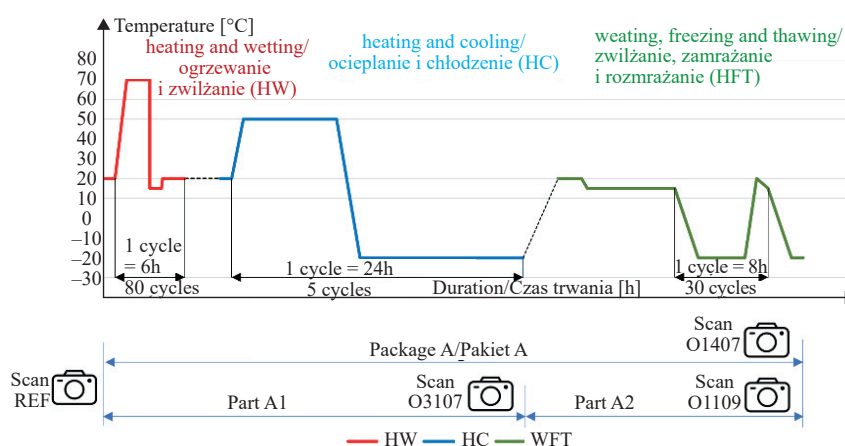


Fig. 2. Diagram of environmental exposure and scanning

Rys. 2. Schemat oddziaływań środowiskowych oraz skanowania

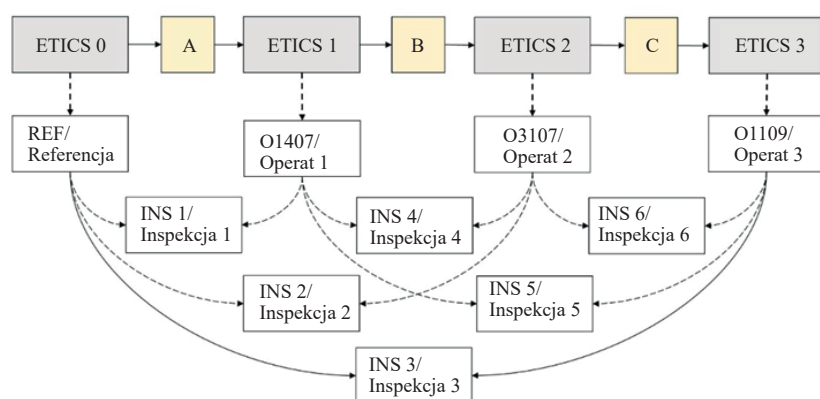


Fig. 3. Flowchart of obtaining the inspection data

Rys. 3. Schemat pozyskiwania danych inspekcyjnych

served, the tests continued with the impact energy gradually increased to 10J. Any cracking, flaking and delamination between the layers visible with the naked eye were treated as damage. The energy level at which no damage was discovered for five impacts was the test result.

Discussion

Based on macroscopic assessment of the model, it was determined that the top layer was white, with a fleece texture and roughness characteristic for the plaster grain size distribution of 1.5 mm. No defects or damage were discovered (Photography 2a). The results of macroscopic assessment after each exposure stage are summarised in Table 2.

nie odnotowano uszkodzeń, kontynuowano je, zwiększając energię uderzenia do 10J. Jako uszkodzenie traktowano pęknięcia, złuszczenia, odspojenia pomiędzy warstwami widoczne okiem nieuzbrojonym. Wynikiem badania był poziom energii, przy której nie stwierdzono uszkodzeń w przypadku pięciu uderzeń.

Dyskusja wyników badań

W ocenie makroskopowej modelu w stanie wyjściowym ustalono, że warstwa wierzchnia miała kolor biały, fakturę „baranka” i chropowatość jak w przypadku tynku o uziarnieniu 1,5 mm. Nie odnotowano wad ani uszkodzeń (fotografia 2a). Wynik oceny makroskopowej, realizowanej po każdym etapie narażeń, zestawiono w tabeli 2.

Table 2. Results of macroscopic evaluation of the top layer at each exposure stage

Tabela 2. Wyniki oceny makroskopowej warstwy wierzchniej na poszczególnych etapach oddziaływań

Top layer damage/ Uszkodzenia warstwy wierzchniej	Exposure stage ¹⁾ /Etap ekspozycji ¹⁾					
	sequence 1/sekwencja 1			sequence 2/sekwencja 2		
	HW	HC	WFT	HW	HC	WFT
Blistering or flaking/ Spęcherzenie lub łuszczenie	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak
Damage or cracking at the thermal insulation panel/board edge/ Uszkodzenia lub pęknięcia na krawędziach płyt termoizolacyjnych	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	YES/TAK
Top layer separation/ [Odspojenia warstwy wierzchniej]	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak	none/brak
Cracking width ≤ 0.2 mm/ Pęknięcia o szerokości ≤ 0.2 mm	none/ brak	none/ brak	YES ²⁾ /TAK ²⁾	YES ³⁾ /TAK ³⁾	YES ³⁾ /TAK ³⁾	YES ³⁾ /TAK ³⁾
Cracking width > 0.2 mm/ Pęknięcia o szerokości > 0.2 mm	none/ brak	none/ brak	none/ brak	YES ⁴⁾ /TAK ⁴⁾	YES ⁴⁾ /TAK ⁴⁾	YES ⁴⁾ /TAK ⁴⁾

HW – heating and wetting, HC – heating and cooling, WFT – wetting, freezing and thawing/HW – ogrzewanie i zwilżanie, HC – ocieplanie i chłodzenie, WFT – zwilżanie, zamrażanie i rozmrażanie

¹⁾ assessment after completing the stage/ocena po zakończeniu danego etapu

²⁾ mainly within the fire barrier, low count, non-oriented course/głównie w obrębie bariery ogniowej, niewielka liczebność, przebieg nieukierunkowany
³⁾ all over the model surface; moderate count outside the fire barrier area, dense pattern in the fire barrier area and at the MW and EPS contact area, fairly non-oriented course/na całej powierzchni modelu; poza obszarem bariery ogniowej liczebność umiarkowana, w obszarze bariery ogniowej oraz w okolicy styku MW i EPS gęsty wzór; przebieg raczej nieukierunkowany

⁴⁾ in the fire barrier area and at the MW and EPS contact area; significant number; non-oriented or horizontal course/
w obrębie bariery ogniowej oraz w okolicy styku MW i EPS; liczność znaczna; przebieg nieukierunkowany lub poziomy

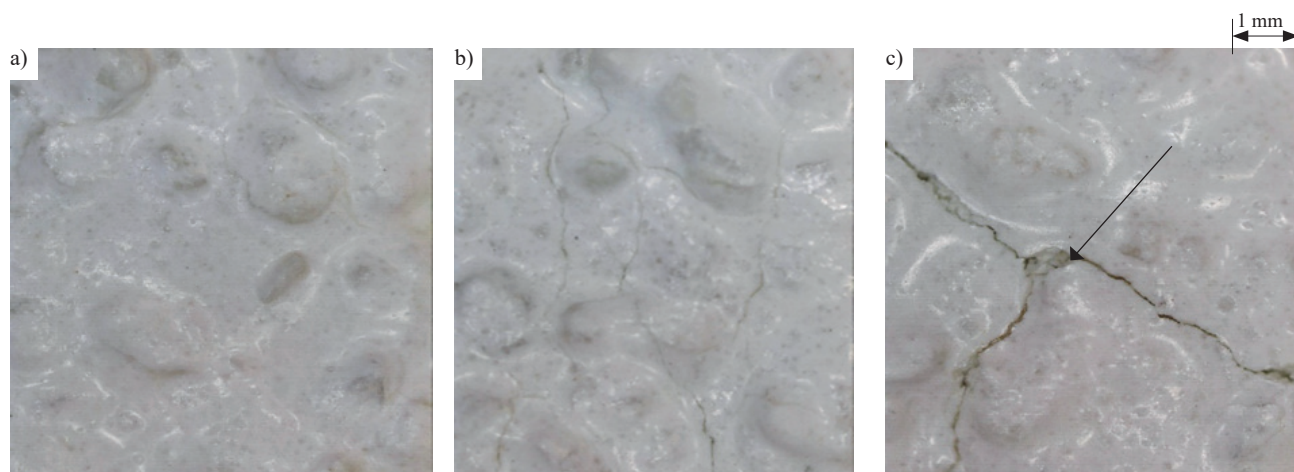


Photo 2. View of the top layer: a) before exposure; b) cracking width ≤ 0.2 mm, mainly in the fire barrier area, after freezing-thawing cycles in the first exposure package; c) cracking width > 0.2 mm in the fire barrier area, after freezing-thawing cycles in the second exposure package

Fot. 2. Widok warstwy wierzchniej: a) w stanie wyjściowym; b) pęknięcia o szerokości $\leq 0,2$ mm, głównie w obrębie bariery ogniowej, po cyklach zamrażania-rozmrażania w pierwszym pakiecie oddziaływań; c) pęknięcia o szerokości $> 0,2$ mm w obszarze bariery ogniowej po cyklach zamrażania-rozmrażania w drugim pakiecie oddziaływań

At no exposure stage was blistering, flaking or top layer separation from thermal insulation materials observed. Cracking was the dominant type of damage, but it was not observed after the first heating and wetting (HW) or heating and cooling (HC) cycle. This result aligns with the studies by Norvaisiene et al. [15] and Krause et al. [17]. The first cracks became apparent after the last stage of the first exposure sequence. It involved thirty wetting, freezing and thawing cycles. The crack width did not exceed 0.2 mm (Photography 2b). A low number of cracks was then observed, primarily in the area of the fire barrier simulating strip. The cracks were essentially non-oriented. This exposure stage was the first exceeding the scope of standard exposure, and it was not considered in papers [15] and [17]. Five cycles of wetting, freezing and thawing are used only in ETICS with the top layer's absorbability > 0.5 kg/m² [6]. After the last stage of the second exposure sequence, cracks ≤ 0.2 mm were observed on almost the entire model's surface. Still, their number was moderate, and they were not clearly oriented. This corresponds to the observations of thin-coat plasters exposed for extended periods. Most of the microcracks were limited to the binder-aggregate phase border [22, 23]. A higher density of cracks, including non-oriented ones, was observed in the fire barrier simulating strip and the joint area between the thermal insulation materials (MW and EPS). The pattern of cracks ≤ 0.2 mm was dense in this area. Moreover, numerous cracks greater than 0.2 mm (Photography 2c) were identified, some of which were non-oriented, while others had a relatively horizontal orientation. The cracking width > 0.2 mm suggests a loss in the finishing layer's barrier function for water [25], which is an indicator of ETICS durability.

Figure 4a shows the results of deformation tests after completing all environmental exposure cycles. The colours indicate surface deviation perpendicular to the wall compared to the reference model (before exposure). Positive deformation values, suggesting surface convexity, are shown in yellow and

Na żadnym z etapów oddziaływań nie odnotowano spęczenia, łuszczenia oraz odspojenia warstwy wierzchniej od materiałów termoizolacyjnych. Dominującym rodzajem uszkodzeń były pęknięcia, przy czym nie obserwowano ich po pierwszej sekwencji ogrzewania i zwilżania (HW) oraz ocieplania i chłodzenia (HC), co potwierdza wyniki prac Norvaisiene i in. [15] oraz Krause i in. [17]. Pęknięcia uwidoczniły się dopiero po ostatnim etapie pierwszej sekwencji narażeń, polegającym na trzydziestu cyklach zwilżania, zamrażania i rozmrażania. Ich szerokość nie przekroczyła 0,2 mm (fotografia 2b). Odnotowano wówczas niewielką liczbę pęknięć, głównie w obrębie pasa symulującego barierę ogniową, przebiegających w sposób nieukierunkowany. Ten etap oddziaływań był pierwszym wykraczającym poza zakres oddziaływań standardowych i nie został uwzględniony w pracach [15 i 17]. Zwilżanie, zamrażanie i rozmrażanie, w liczbie pięciu cykli, stosuje się tylko w przypadku ETICS z warstwą wierzchnią o nasiąkliwości > 0.5 kg/m² [6].

Po ostatnim etapie drugiej sekwencji narażeń obserwowano pęknięcia $\leq 0,2$ mm na prawie całej powierzchni modelu, ale w umiarkowanej liczbie i bez wyraźnego ukierunkowania, co koreluje z obserwacjami tynków cienkowarstwowych poddanych długotrwałej ekspozycji, przy czym zwykle mikropęknięcia ograniczały się do granicy faz spoiwo-kruszywo [22, 23]. Większą gęstość pęknięć, również nieukierunkowanych, obserwowano w pasie symulującym barierę ogniową i w obszarze łączenia materiałów termoizolacyjnych – MW i EPS. Pęknięcia $\leq 0,2$ mm utworzyły tu gęsty wzór. W obszarze tym zidentyfikowano ponadto liczne pęknięcia $> 0,2$ mm (fotografia 2c), część nieukierunkowanych, a część o przebiegu raczej poziomym. Szerokość pęknięć $> 0,2$ mm sugeruje utratę funkcji barierowej warstwy wykończeniowej wobec wody [25], która jest wyznacznikiem trwałości ETICS.

Na rysunku 4a przedstawiono wyniki badań deformacji po zakończeniu wszystkich cykli oddziaływań środowiskowych. Kolorami oznaczono odchylenia powierzchni w kierunku prostopadłym do ściany względem modelu referencyjnego (przed

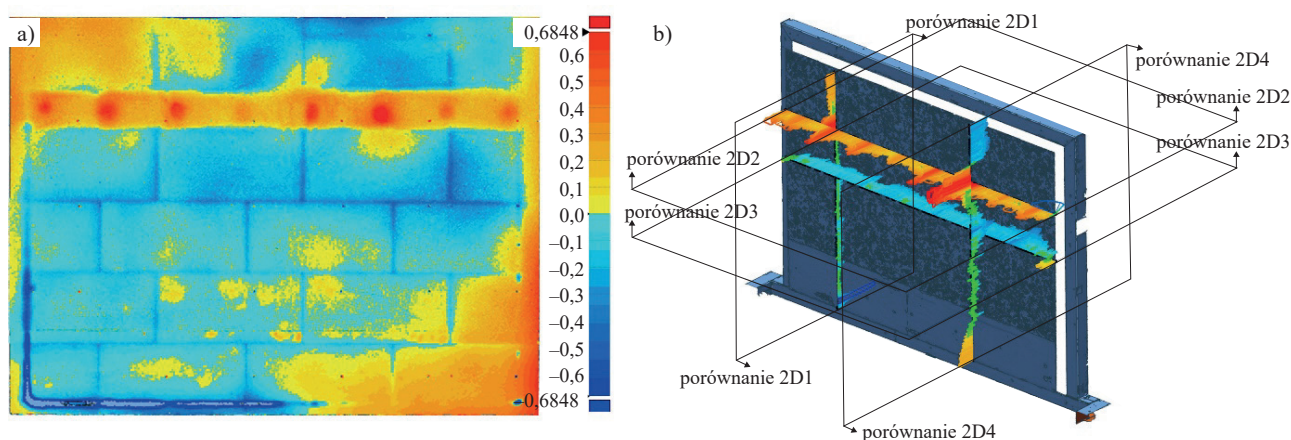


Fig. 4. Test mock-up of the thermal insulation model: a) deformation map; b) selected deformation cross-sections

Rys. 4. Makieta testowa modelu ocieplenia: a) mapa deformacji; b) wybrane przekroje deformacji

red. Negative values, representing concavity, are marked in blue and navy. Figure 4b shows a positive deformation in the mineral wool strip and a negative deformation (concavity – blue) in the wall's central part. Moreover, a local convexity of the surface can be observed in the top left and bottom right corners of the test element. In addition to the noticeable positive deformations, in the central part of the model, in the mineral wool strip area, one can see the divisions of the thermal insulation boards as navy blue horizontal and vertical lines.

Surface deformation measurements helped identify the areas where rapid changes in the deformation direction occur. This may lead to microcracking in the top layer. Compromising the top layer's integrity during further use may result in the failure propagation and degradation, and, consequently, a gradual loss of functionality. Detailed deformation analyses are shown in [26] and [27].

The top layer's adhesion to the thermal insulation materials is among the key performance characteristics of ETICS [25]. It is assumed that the adhesion shall not be less than 80 kPa. Alternatively, the destruction should be cohesive within the thermal insulation material [6]. The tests preceding those on the resistance to environmental factors [27] revealed that the EPS adhesion before exposure amounted to 107 kPa for an 80% cohesive damage within the EPS. For the MW, it was 26 kPa for a fully cohesive damage in the MW. After exposure, the adhesion to EPS and MW decreased by 60% and 50%, respectively (Figure 5). This significant decrease was not observed after standard cycles [17]. Norvaišienė et al. [15] reported poorer adhesion in the EPS and MW contact area, despite no visually discovered damage to the finishing layer. The observed adhesion deterioration may suggest that water has penetrated the thermal insulation materials due to cracking in the top layer. This resulted in the exacerbation of both EPS and MW strength parameters [25]. Cohesive damage within the plaster, up to 30%, is worth attention as it may suggest deterioration in the plaster strength [28]. It is positive that no adhesion damage was observed.

In the hard body impact resistance test, in all areas – on EPS, MW and the materials' joint area – cracks with up to 34 mm diameters were reported at the impact energy of 3J. The cracking

obciążeniem). Dodatkowo wartości deformacji, wskazujące na uwypuklenie powierzchni, zaznaczono kolorami żółtym i czerwonym, natomiast wartości ujemne, odpowiadające wklęsnięciu, przedstawiono w odcieniach niebieskiego i granatu. Na rysunku 4b wyraźnie widoczna jest dodatnia deformacja w obszarze pasa z wełny mineralnej oraz ujemna (wklęsnięcie – kolor niebieski) w centralnej części ściany. Ponadto można zaobserwować lokalne uwypuklenia powierzchni w lewym górnym oraz prawym dolnym narożniku elementu testowego. W obrębie pasa z wełny mineralnej, oprócz widocznych deformacji dodatnich, w centralnej części modelu wyraźnie zaznaczają się podziały płyt izolacyjnych (granatowe linie pionowe i poziome).

Pomiary deformacji powierzchni pozwoliły na identyfikację obszarów, w których dochodzi do gwałtownych zmian kierunku odkształceń, co może prowadzić do mikropęknięć w warstwie wierzchniej. Naruszenie jej ciągłości w dalszym okresie eksploatacji może skutkować propagacją uszkodzeń oraz degradacją, co w konsekwencji prowadzi do stopniowej utraty funkcjonalności. Szczegółowe analizy deformacji przedstawiono w [26 i 27].

Przyczepność warstwy wierzchniej do materiału termoizolacyjnego jest jedną z kluczowych właściwości użytkowych ETICS [25]. Przyjmuje się, że powinna być ona nie mniejsza niż 80 kPa. Alternatywnie zniszczenie musi mieć charakter kohezyjny w obrębie materiału termoizolacyjnego [6]. W badaniach poprzedzających testy odporności na czynniki środowiskowe [27] ustalono, że w stanie wyjściowym, w przypadku EPS, przyczepność wynosiła 107 kPa przy zniszczeniu kohezyjnym w obrębie EPS 80%, a w przypadku MW 26 kPa przy w pełni kohezyjnym zniszczeniu w MW. Po oddziaływaniach przyczepność do EPS i MW zmniejszyła się odpowiednio o 60 i 50% (rysunek 5). Tak istotnego zmniejszenia nie obserwowano po standardowych cyklach [17]. Norvaišienė i in. [15] odnotowali osłabienie przyczepności w obszarze łączenia EPS i MW, pomimo braku uszkodzeń warstwy wykończeniowej w ocenie wizualnej. Obserwowane pogorszenie przyczepności może sugerować, iż woda przeniknęła do materiałów termoizolacyjnych w wyniku pęknięć warstwy wierzchniej, co skutkowało pogorszeniem parametrów wytrzymałościowych EPS i MW [25]. Uwagę zwraca kohezyjne

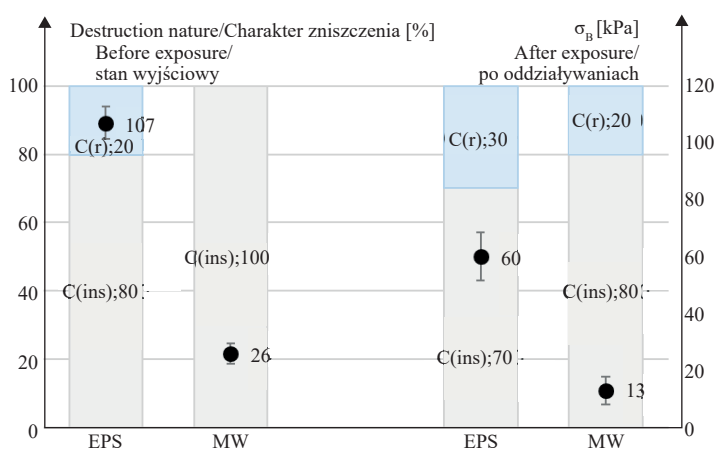


Fig. 5. Top layer's adhesion to EPS and MW expressed by • the value of tensile stress σ_B and nature of damage: C – cohesive damage within thermal insulation material (ins), plaster (r); the error bars present standard deviation σ_B ; according to [26]

Rys. 5. Przyczepność warstwy wierzchniej do EPS i MW wyrażona • wartością naprężeń rozciągających σ_B oraz charakterem zniszczenia: C – kohezyjne w obrębie materiału termoizolacyjnego (ins), tynku (r); słupki błędów prezentują odchylenie standardowe σ_B , wg [26]

Table 3. Impact resistance

Tabela 3. Odporność na uderzenie

Thermal insulation material/ Material termoizolacyjny	Impact energy/ Energia uderzenia	Damage/damage size [mm], cracking width [mm]/ Uszkodzenia/wielkość uszkodzeń [mm]/ szerokość pęknięć [mm]	Category/Kategoria
EPS	3J	cracking with no penetration/25 ÷ 33/<0.2/ pęknięcie bez penetracji/25 ÷ 33/< 0,2	III
MW	3J	cracking with no penetration/24 ÷ 34/<0.2/ pęknięcie bez penetracji/24 ÷ 34/< 0,2	III
EPS/MW	3J	cracking with no penetration/25 ÷ 34/<0.2/ pęknięcie bez penetracji/25 ÷ 34/< 0,2	III

did not penetrate the thermal insulation material (table 3). The above authorises classifying the thermal insulation as category III, corresponding to [25]. The EPS and MW joining area behaved similarly, as observed by Norvaišien et al. [15]. No delamination was observed between the rendering and the base layer, nor between the base layer and the thermal insulation material. No base layer delamination or reinforcement exposure was observed, either.

Considering the achieved impact resistance class, the tested solution can be described as relevant for use in the zones where a risk of damage occurs due to standard impacts caused by humans or by objects being thrown or kicked [6]. It should be emphasised that despite intensive exposure, the achieved impact resistance level was characteristic for ETICS with mineral plaster [30]. Consequently, it did not affect the system's resistance.

Conclusions

The results analysis leads to the conclusion that an EPS-based thermal insulation system with a mineral wool strip affixed on top is, in a visual assessment, resistant to environmental factors simulated in a laboratory, similar to a standard ETICS with absorbability < 0.5 kg/m². Supplementing the impacts with freezing

zniszczenie w obrębie tynku, dochodzące do 30%. Może to sugerować pogorszenie jego wytrzymałości [28]. Nie obserwowano natomiast zniszczenia adhezyjnego, co jest zjawiskiem pozytywnym.

W badaniu odporności na uderzenie ciałem twardym odnotowano we wszystkich obszarach (na EPS, MW oraz na łączeniu tych materiałów) przy energii uderzenia 3J pęknięcia o średnicy do 34 mm, bez penetracji w materiał termoizolacyjny (tabela 3). Pozwala to na sklasyfikowanie ocieplenia w kategorii III, co koresponduje z [25]. Obszar łączenia EPS i MW zachował się podobnie, jak zaobserwowali Norvaišien i in [15]. Nie odnotowano rozwarstwienia między wyprawą tynkarską a warstwą bazową, między warstwą bazową a materiałem termoizolacyjnym, jak też nie zaobserwowano rozwarstwienia w warstwie bazowej ani odsłonięcia zbrojenia.

Uwzględniając uzyskaną klasę odporności na uderzenia, testowane rozwiązanie można uznać za odpowiednie do stosowania w strefach, w których występuje ryzyko uszkodzenia przez normalne uderzenia spowodowane przez ludzi lub przez rzucone lub kopnięte przedmioty [6]. Należy zaznaczyć, iż mimo intensywnego narażenia uzyskano odporność na poziomie charakterystycznym dla ETICS z tynkiem mineralnym [30].

Wnioski

Analiza uzyskanych wyników prowadzi do wniosku, że ocieplenie na bazie EPS, w którym umieszczono pas z wełny mineralnej, wykazuje w ocenie wizualnej odporność na działanie czynników środowiskowych, symulowanych laboratoryjnie w wymiarze standardowym dla ETICS o nasiąkliwości < 0,5 kg/m². Uzupełnienie oddziaływań o cykle zamrażania i rozmrażania spowodowało powstanie niewielkiej liczby niekierunkowych pęknięć w warstwie wierzchniej. Obserwowano je tylko w strefie bariery ogniowej. Szerokość pęknięć nie przekraczała 0,2 mm, co można traktować jako utrzymanie szczelności warstwy wierzchniej.

Rozszerzona ekspozycja na czynniki środowiskowe, zastosowana ze względu na obserwowany wzrost intensywności

and thawing cycles resulted in the formation of a small number of non-oriented cracks in the top layer. They were observed only in the fire barrier zone. The cracking width did not exceed 0.2 mm, which can be treated as maintaining the top layer's tightness.

Extended exposure to environmental factors executed because of the observed increase in the impact intensity due to climate change, increased the cracking severity and expansion of its occurrence area. In the MW strip and EPS-MW contact area, cracks formed a dense network, whereas in other areas, they occurred sparsely. In the fire barrier area, cracks wider than 0.2 mm were observed, indicating a possible loss of watertightness.

An inspection analysis of the data collected in 3D scanning revealed deformation caused by long-lasting exposure. They were most noticeable in the MW strip. 3D scanning can be deemed an effective diagnostic tool, enabling precise detection of ETICS surface geometry changes. The use of 3D scanning and inspection analyses helped detect surface shape irregularities in the mineral wool strip installation areas. The observation suggests which zones can be potentially susceptible to microcracking. Identification of such areas is pivotal in diagnostics as it may signal the beginning of the top layer degradation. Furthermore, this results in a loss of ETICS functionality. Moreover, a precise deformation measurement enables the determination of new standards for construction diagnostics, including, but not limited to, monitoring structures exposed to variable weather conditions.

Long-term exposure to environmental factors deteriorated the adhesion of the top layer to the thermal insulation material. It also entailed shifting the damage area towards the rendering. No deterioration in the impact resistance was observed.

To sum up, the tested EPS-based thermal insulation system with a mineral wool strip had an acceptable resistance to standard, European-averaged hydrothermal exposures. Long-lasting exposure to environmental factors led to the loss of watertightness, and consequently to the deterioration of the thermal insulation's critical performance characteristics.

The study was carried out under NZM-067 finance from the Own Research Fund of the Building Research Institute, in cooperation with the Association for Thermal Insulation Systems.

Received: 18.02.2025

Revised: 31.03.2025

Published: 21.08.2025

ności oddziaływań wskutek zmian klimatycznych, spowodowała nasilenie pęknięć wraz ze poszerzeniem obszarów występowania. W pasie MW i w obszarze styku EPS-MW tworzyły one gęstą sieć, a na pozostałym obszarze występowały w stopniu nieznacznym. W strefie bariery ogniowej obserwowano pęknięcia szersze niż 0,2 mm, co wskazuje na możliwość utraty wodoszczelności.

Analiza inspekcyjna danych zebranych podczas skanowania 3D ujawniła odkształcenia spowodowane długotrwałą ekspozycją. Były one najbardziej widoczne w obrębie pasa MW. Skanowanie 3D można uznać za skuteczne narzędzie diagnostyczne, umożliwiające precyzyjne wykrywanie zmian geometrii powierzchni ETICS. Wykorzystanie technologii skaningu 3D oraz analiz inspekcyjnych pozwoliło na wykrycie zaburzeń kształtu powierzchni w obszarach instalacji pasa z wełny mineralnej. Obserwacja ta wskazuje na potencjalne strefy podatne na mikropęknięcia. Identyfikacja takich miejsc ma kluczowe znaczenie w diagnostyce, ponieważ może sygnalizować początek degradacji warstwy wierzchniej, co w dalszej perspektywie skutkuje utratą funkcji ETICS. Ponadto, precyzyjny pomiar deformacji umożliwia wyznaczanie nowych standardów diagnostyki budowlanej, szczególnie dotyczącej monitorowania obiektów narażonych na zmienne warunki atmosferyczne.

Długotrwałe działanie czynników środowiskowych skutkowało pogorszeniem przyczepności warstwy wierzchniej do materiału termoizolacyjnego, z przesunięciem strefy uszkodzenia w kierunku wyprawy tynkarskiej. Nie zaobserwowano pogorszenia odporności na uderzenia.

Stwierdzono, że testowane ocieplenie na bazie EPS z pasem wełny mineralnej wykazywało akceptowalną odporność na standardowe, uśrednione w Europie, narażenia hydrotermiczne. Długotrwałe działanie czynników środowiskowych doprowadziło do utraty wodoszczelności, w wyniku czego nastąpiło pogorszenie niektórych krytycznych właściwości użytkowych ocieplenia.

Praca zrealizowana w ramach NZM-067 z środków Funduszu Badań Własnych Instytutu Techniki Budowlanej, we współpracy ze Stowarzyszeniem na Rzecz Systemów Ociepleń.

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 31.03.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

[1] Michałowski B, Marcinek M, Tomaszewska J, Czernik S, Piasecki M, Geryło R, Michalak J. Influence of Rendering Type on the Environmental Characteristics of Expanded Polystyrene-Based External Thermal Insulation Composite System. Buildings 2020; <https://doi.org/10.3390/buildings10030047>

[2] Pasker R. The European ETICS market—Do ETICS sufficiently contribute to meet political objectives? In Proceedings of the 4th European ETICS Forum, Warsaw, Poland, 5 October 2017; European Association for External Thermal Insulation Composite Systems (EAE): Baden-Baden, Germany, 2017

[3] Michalak J. External thermal insulation composite systems (ETICS) from industry and academia perspective. Sustainability 2021; <https://doi.org/10.3390/su132413705>

[4] Sudoł E, Kozikowska E. Mechanical Properties of Polyurethane Adhesive Bonds in a Mineral Wool-Based External Thermal Insulation Composite System for Timber Frame Buildings. Materials 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14102527>

[5] Michalak J, Czernik S, Marcinek M, Michałowski B. Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland. Sustainability 2020; <https://doi.org/10.3390/su12114532>

[6] EAD 040083–01–0404; European Assessment Document External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Renderings. European Organization for Technical Assessment (EOTA); 2020

- [7] SITP WP-03:2018; Design Guidelines: Insulation of Building Facades due to Fire Safety. Association of Firefighting Engineers and Technicians: 2018. (In Polish): Warsaw, Poland.
- [8] Tavares J, Silva A, de Brito J. Computational models applied to the service life prediction of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *J. Build. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100944>
- [9] Landolfi R, Nicoletta M. Durability Assessment of ETICS: Comparative Evaluation of Different Insulating Materials. *Sustainability* 2022; <https://doi.org/10.3390/su14020980>
- [10] Gonçalves M, Simões N, Serra C, Almeida J, Flores-Colen I, Vieira de Castro N, Duarte L. Onsite monitoring of ETICS comparing different exposure conditions and insulation materials. *J. Build. Eng.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103067>
- [11] Parracha JL, Borsoi G, Veiga R, Flores-Colen I, Nunes L, Garcia AR, Ilharco LM, Dionísio A, Faria P. Effects of hygrothermal, UV and SO₂ accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments. *Build. Environ.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108151>
- [12] Parracha JL, Borsoi G, Flores-Colen I, Veiga R, Nunes L, Dionísio A, Gomes MG, Faria P. Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties. *Constr. Build. Mater.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121956>
- [13] Niziurska M, Wiczorek M, Borkowicz K. Fire Safety of External Thermal Insulation Systems (ETICS) in the Aspect of Sustainable Use of Natural Resources. *Sustainability* 2022; <https://doi.org/10.3390/su14031224>
- [14] Čolić A, Pečur IB. Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. *Fire Technol.* 2020; <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00950-w>
- [15] Norvaišienė R, Krause P, Buhagiar V, Burlingis A. Resistance of ETICS with Fire Barriers to Cyclic Hygrothermal Impact. *Sustainability* 2021; <https://doi.org/10.3390/su13169220>
- [16] European Organization for Technical Assessment. Guideline for European Technical Approval ETAG 004 External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). 2013
- [17] Krause P, Norvaišienė R. Temperature and humidity tests of the ETICS system with a fire barrier. *Mater. Bud.* 2020; <https://doi.org/10.15199/33.2020.05.02>
- [18] Barreira E, de Freitas VP. Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS). *Build. Environ.* 2013; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.001>
- [19] Kvande T, Bakken N, Bergheim E, Thue J. Durability of ETICS with Rendering in Norway—Experimental and Field Investigations. *Buildings* 2018; <https://doi.org/10.3390/buildings8070093>
- [20] Maia J, Ramos NMM, Veiga R. A new durability assessment methodology of thermal mortars applied in multilayer rendering systems. *Constr. Build. Mater.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.178>
- [21] Garecki M, Bednarczyk K, Świercz P, Pogorzalet P, Kulesza M, Michałowski B. Dylatacja 25-go metra. In *Skutki–Przyczyny–Realne Wyzwania, Proceedings of the International Conference ETICS, Łochów, Poland, 11–13 May 2022*; (In Polish), Polish Association for Insulation Systems.
- [22] Bochen J. Weathering effects on physical–chemical properties of external plaster mortars exposed to different environments. *Constr. Build. Mater.* 2015; <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.12.079>
- [23] Ślusarek J, Orlik-Koźdoń B, Bochen J, Muzyczuk T. Impact of the imperfection of thermal insulation on structural changes of thin-layer façade claddings in ETICS. *J. Build. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101487>
- [24] ISO 7892:1988; Vertical Building Elements. Impact Resistance Tests. Impact Bodies and General Test Procedures
- [25] Norvaišienė R, Buhagiar V, Burlingis A, Miškinis K. Investigation of mechanical resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS). *J. Build. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101682>
- [26] Piekarczyk A, Sudoł E, Mazurek A. Measurement analysis of Large-Area elements of external thermal insulation Composite Systems using 3D scanning techniques. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2024; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114755>
- [27] Sudoł E, Piekarczyk A, Kozikowska E, Mazurek A. Resistance of External Thermal Insulation Systems with Fire Barriers to Long-Lasting Weathering. *Materials* 2024; <https://doi.org/10.3390/ma17133113>
- [28] Malanho S, Veiga M. Bond strength between layers of ETICS—Influence of the characteristics of mortars and insulation materials. *J. Build. Eng.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101021>
- [29] Parracha JL, Veiga R, Flores-Colen I, Nunes L. Toward the Sustainable and Efficient Use of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS): A Comprehensive Review of Anomalies, Performance Parameters, Requirements and Durability. *Buildings* 2023; <https://doi.org/10.3390/buildings13071664>
- [30] Sudoł E, Dębski D, Zamorowska R, Francke B. Impact resistance of external thermal insulation systems. *MATEC Web Conf.* 2018; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816308004>