

mgr Anna Satlawa^{1*)}

ORCID: 0009-0001-9627-9063

prof. dr hab. inż. Janusz Juraszek¹⁾

ORCID: 0000-0003-3771-2776

Analysis of temperature distribution in a two- and three-layer partition using FBG sensors

Analiza rozkładu temperatury w przegrodzie dwu- i trójwarstwowej z wykorzystaniem czujników FBG

DOI: 10.15199/33.2025.06.06

Abstract: The regulation WT 2021 allows for a maximum heat transfer coefficient through external partitions $U = 0.2$ [W/m²K]. However, such a scalar definition of the insulation properties of the partition is often insufficient. The structures of external building partitions are usually multi-layered. For this type of wall, it is necessary to know the actual temperature distribution inside the partition, which allows for the accurate calculation of the direction and density of the heat flux, as well as the calculation of temperatures on the boundary surfaces to ensure the absence of water vapor condensation. For existing walls and those undergoing modernization, the most effective way to determine such a distribution is to measure temperatures inside the partition using sensors. In the presented article, modern FBG fiber optic sensors were used to measure temperatures inside the partition. They are characterized by high measurement resolution, high reliability and reduce the invasiveness of the tests to a minimum, in relation to classic temperature measurement sensors. The results of the analysis fully confirmed the validity of using FBG sensors for temperature measurement, thus allowing for precise calculation of the temperature distribution inside the partition.

Keywords: FBG temperature sensors; temperature distribution; optical fibers; thermal modernization.

Fiber Bragg grating (FBG) sensors are modern fiber optic sensors that can be used to measure the distribution of strain, temperature and humidity. They are characterized by very high sensitivity, resolution, linear dependence of the wavelength shift, and immediate reaction to the application of force or a temperature change. Last but not least, they have a long service life.

The fundamentals of the method of strain and temperature measurements based on FBG sensors are presented in [2÷4]. Practical implementation of FBG sensors for long-term measurements of temperature distributions in multi-layer building envelopes is presented in [5÷7]. In the years 2020–2021 comparative tests of the two-layer wall were carried out using fiber Bragg grating sensors and equivalent classic temperature sensors, as presented in [8].

Streszczenie: Rozporządzenie WT 2021 dopuszcza maksymalny współczynnik przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne $U = 0,2$ [W/m²K]. Takie skalarne określenie właściwości izolacyjnych przegrody jest jednak często niewystarczające. Konstrukcje zewnętrznych przegród budowlanych są zazwyczaj wielowarstwowe. W przypadku tego typu ścian konieczna jest znajomość rzeczywistego rozkładu temperatury wewnątrz przegrody, który umożliwia dokładne obliczenie kierunku i gęstości strumienia ciepła, a także temperatury na powierzchniach granicznych w celu zapewnienia braku wykraplania pary wodnej. Natomiast w przypadku ścian już istniejących i poddawanych modernizacji, najbardziej skutecznym sposobem określenia takiego rozkładu jest pomiar temperatury wewnątrz przegrody za pomocą czujników.

W przedstawionym artykule do pomiaru temperatury wewnątrz przegrody wykorzystano nowoczesne czujniki światłowodowe FBG. Charakteryzują się one dużą rozdzielczością pomiarów, dużą niezawodnością oraz ograniczają do minimum inwazyjność prowadzonych badań w porównaniu z klasycznymi czujnikami pomiaru temperatury. Wyniki przeprowadzonej analizy w pełni potwierdziły zasadność stosowania czujników FBG do pomiaru temperatury, pozwalając tym samym na precyzyjne obliczenie rozkładu temperatury wewnątrz przegrody.

Słowa kluczowe: czujniki temperatury FBG; rozkład temperatury; światłowody; termomodernizacja.

Czujniki FBG (Fiber Bragg Grating) to nowoczesne czujniki światłowodowe, za pomocą których można wykonywać pomiary rozkładu odkształceń, temperatury i wilgotności [1]. Charakteryzują się bardzo dużą czułością, rozdzielczością, liniową zależnością przesunięcia długości fali, natychmiastową reakcją wywołaną przyłożeniem siły lub zmianą temperatury oraz, co istotne, znaczną trwałością eksploatacyjną.

Podstawy metody pomiarów odkształceń i temperatury za pomocą czujników FBG przedstawiono w pracach [2÷4]. Praktyczną implementację czujników FBG do długookresowych pomiarów rozkładu temperatury w wielowarstwowych przegrodach zewnętrznych zaprezentowano w artykułach [5÷7]. W latach 2020–2021 przeprowadzono badania porównawcze ścian dwuwarstwowej przy użyciu światłowodowych czujników z siatką Bragga oraz równoważnych klasycznych czujników temperatury, które przedstawiono w artykule [8].

Elementem pomiarowym czujnika jest siatka Bragga naniesiona na wewnętrzną powierzchnię rdzenia światłowodu (rys-

¹⁾ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

^{*)} Correspondence address: satlawa44@gmail.com

The sensor measuring element is a Bragg grating embedded in the optical fiber core (Figure 1). The most important advantage of the method is the possibility of creating Bragg gratings with high repeatability and at any constant. The measurement by means of FBG sensors is based on Bragg's law [8], that is, the measurement of the wavelength of light reflected by the diffraction grating due to the Fresnel effect [9]. The reflected wavelength λ_B is referred to as the Bragg wavelength and determined by the following relation:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

where:

λ_B – wavelength;;

n_{eff} – effective refractive index of the grating in the fiber core;

Λ – grating constant.

nek 1). Najistotniejszą zaletą tej metody jest możliwość tworzenia siatek Bragga z dużą powtarzalnością i dowolną stałą. Idea pomiaru w czujnikach FBG polega na wykorzystaniu prawa Bragga [8], czyli pomiarze długości fali światła odbitego przez siatkę dyfrakcyjną na skutek efektu Fresnela [9]. Odbita długość fali λ_B nazywana jest długością fali Bragga i określona przez zależność:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

gdzie:

λ_B – długość fali;

n_{eff} – efektywny współczynnik załamania siatki w rdzeniu włókna;

Λ – stała siatki.

Tested structure and measuring stand

The paper presents the temperature distribution for two different structures of the building envelope: a two- and a three-layer external partition. The boundary conditions on the external surfaces of the partitions under analysis were the same, i.e. the temperature and humidity of the air on the inside were the same for both partitions, and so were the external environmental conditions. The two-layer wall is made of a layer of cellular concrete and a layer of styrofoam (EPS). The three-layer wall consists of a layer of cellular concrete, a layer of EPS, and cladding. There is an air gap between the EPS and the cladding. The structures of the partitions, along with the location of FBG temperature measurement sensors (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4), are shown in Figure 2.

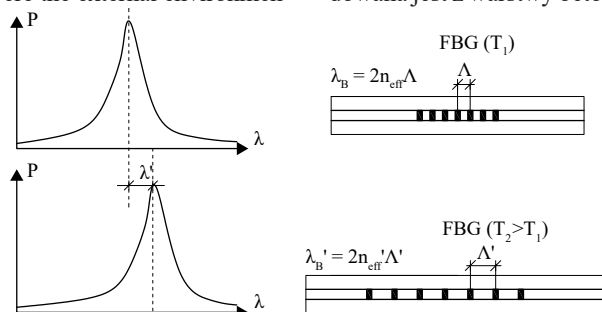


Fig. 1. Change of the Bragg wavelength caused by thermal loading of the FBG sensor

Rys. 1. Zmiana długości fali Bragga wywołana obciążeniem termicznym czujnika FBG

Obiekt badań i stanowisko pomiarowe

W artykule przedstawiono rozkład temperatury w przypadku dwóch różnych konstrukcji przegród zewnętrznych dwu- i trójwarstwowej. Warunki brzegowe na zewnętrznych powierzchniach analizowanych przegród były takie same, tzn. temperatura i wilgotność powietrza po wewnętrznej stronie była jednakowa w obu przegrodach, a także zewnętrzne warunki środowiskowe były identyczne. Ściana dwuwarstwowa zbudowana jest z warstwy betonu komórkowego i styropianu EPS. Ściana trójwarstwowa składa się z warstwy betonu komórkowego, styropianu EPS i okładziny. Pomiedzy styropianem EPS a okładziną występuje pustka powietrzna. Konstrukcje przegród wraz z rozmieszczeniem czujników FBG do pomiaru temperatury (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4) przedstawiono na rysunku 2. Do pomiaru temperatury na wewnętrznych powierzchniach

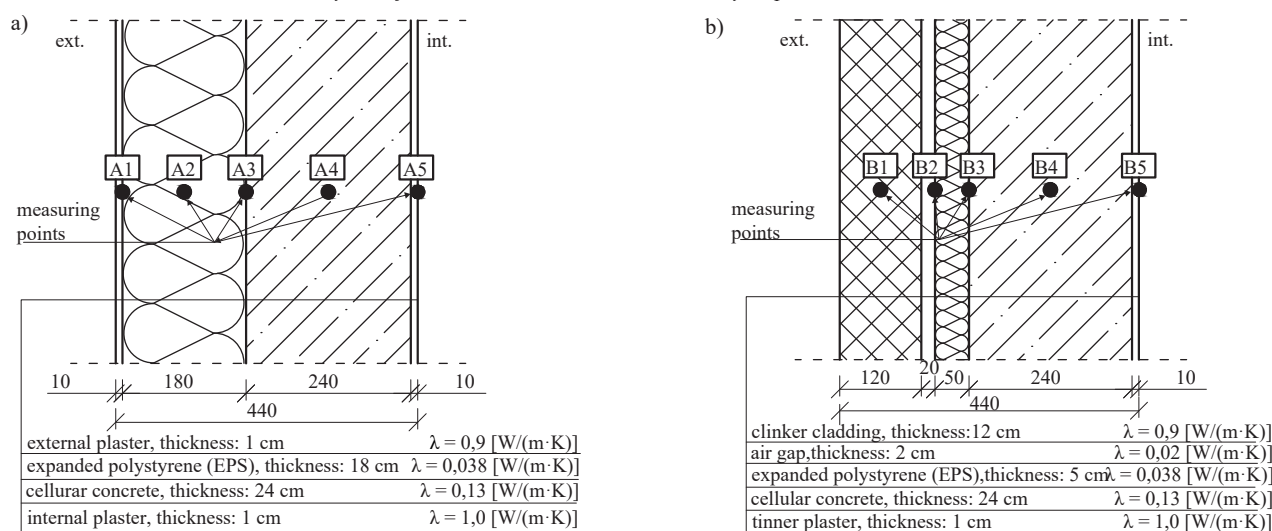


Fig. 2. Schematic diagram of the sensor arrangement in the tested partitions: a) two-layer; b) three-layer

Rys. 2. Schemat rozmieszczenia czujników w badanych przegrodach: a) ściana dwuwarstwowa; b) ściana trójwarstwowa

Fig. own study

Rys. opracowanie własne

The temperature on the internal surfaces of the partitions was measured using DS18B20 digital contact sensors, marked as A5 and B5 in the figures.

The design of the measuring probe is a novel solution, designed for a given thickness of the partition. An optical fiber with embedded Bragg gratings was implemented in it. A diagram of the adopted design solutions is presented in Figure 3. Before the probe was mounted on the test stand, the FBG sensor measuring path had been calibrated using a CTM9100–150 temperature bath calibrator. The total measurement accuracy of the path determined in this way is $\pm 0.5^\circ\text{C}$. The sensor design enables embedding it in a 6 mm hole drilled in the partition.

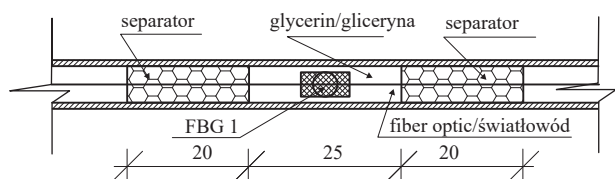


Fig. 3. Construction details of the measuring probe

Fig. own study

Rys. 3. Szczegóły konstrukcyjne budowy sondy pomiarowej

Rys. opracowanie własne

Results of the temperature measurement in the partition

The comparative analysis of the temperature distribution in the two- and three-layer partition was carried out based on the temperature measurement results recorded on 23 January 2025. The graphs show the measured daily temperature distribution for the two- and three-layer partition. The graph also shows selected points where a detailed analysis and comparison of the temperature distribution inside the investigated partitions were performed (Figure 4).

In order to show the temperature change in the partitions, the points selected for further analysis correspond to 6:00, 12:00 and 18:00 hours. Such a selection makes it possible to trace the influence of daily changes in ambient temperature and to conduct a comparative analysis of the impact of these changes on the temperature distribution in the partitions. The large temperature fluctuations recorded on the outside of the two-layer partition are due to the location of sensor A1 directly on the external surface of the insulation layer (EPS).

Figure 5 shows a comparison of the temperature distribution at selected points in the two- and three-layer partition under analysis. For comparative purposes, heat transfer resistance curves are also marked in the chart in the partitions, with particular reference to the point at which the temperature was measured.

The heat transfer resistance values at these points are summarized in Table 1.

For both partition structures, despite the partition exposure to changes in the ambient temperature with an amplitude of 10° , the temperature distribution in the layer made of cellular concrete varies only slightly ($1\text{--}2^\circ\text{C}$). The temperature distribution in this layer is linear due to a low heat flux value and a low temperature gradient.

przegród zastosowano przylgowe czujniki cyfrowe DS18B20, oznaczone na rysunkach symbolami A5 i B5.

Konstrukcja sondy pomiarowej jest nowym rozwiązaniem, zaprojektowanym do danej grubości przegrody. Zaimplementowano w nim światłowód z naniesionymi siatkami Bragga. Schemat ideowy przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rysunku 3. Przed zamontowaniem sondy na stanowisku badawczym, tor pomiarowy czujnika FBG poddano wzorcowaniu za pomocą temperaturowego kalibratora kąpielowego CTM9100–150. Wyznaczona w ten sposób całkowita dokładność pomiarowa toru wynosi $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Konstrukcja czujnika umożliwia wbudowanie go do wywierconego w przegrodzie otworu o średnicy 6 mm.

Wyniki pomiarów temperatury w przegrodzie

Analizę porównawczą rozkładu temperatury w przegrodzie dwu- i trójwarstwowej przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów temperatury zarejestrowanych 23.01.2025 r. Na rysunku 4 przedstawiono zmierzony, dobowy rozkład temperatury w przegrodzie dwu- i trójwarstwowej. Zaznaczono wybrane punkty, w których dokonano szczegółowej analizy i porównania rozkładu temperatury wewnątrz badanych przegród. W celu przedstawienia zmiany temperatury w przegrodach, wybrane do dalszej analizy punkty odpowiadają godzinie 6:00, 12:00 i 18:00. Taki wybór punktów pozwala prześledzić wpływ dobowych zmian temperatury otoczenia i przeprowadzić analizę porównawczą wpływu tych zmian na rozkład temperatury w przegrodach. Zarejestrowane duże wahania temperatury po zewnętrznej stronie przegrody dwuwarstwowej spowodowane są umiejscowieniem czujnika A1 bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni warstwy izolacji (styropianu EPS).

Rysunek 5 przedstawia porównanie rozkładu temperatury w wybranych do analizy punktach w przegrodach dwu- i trójwarstwowej. W celach porównawczych na wykresy naniesiono również krzywe wartości oporu przejmowania ciepła w przegrodach, ze szczególnym uwzględnieniem punktów, w których dokonywano pomiaru temperatury. Wartości oporu przejmowania ciepła w tych punktach podano w tabeli.

W przypadku obu konstrukcji przegród rozkład temperatury w warstwie wykonanej z betonu komórkowego, pomimo ekspozycji przegrody na zmieniającą się temperaturę otoczenia o amplitudzie

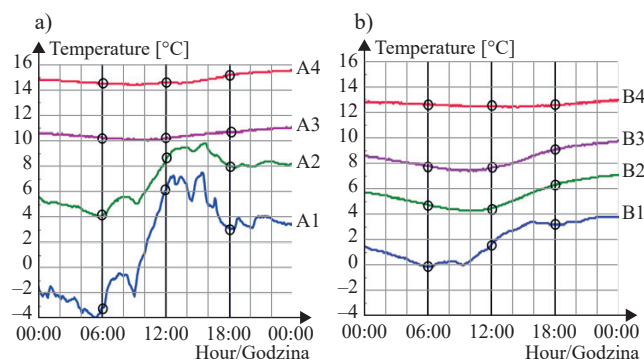


Fig. 4. Daily temperature distribution in: a) two-layer partition; b) three-layer partition

Fig. own study

Rys. 4. Dobowy rozkład temperatury w przegrodzie: a) dwuwarstwowej; b) trójwarstwowej

Rys. opracowanie własne

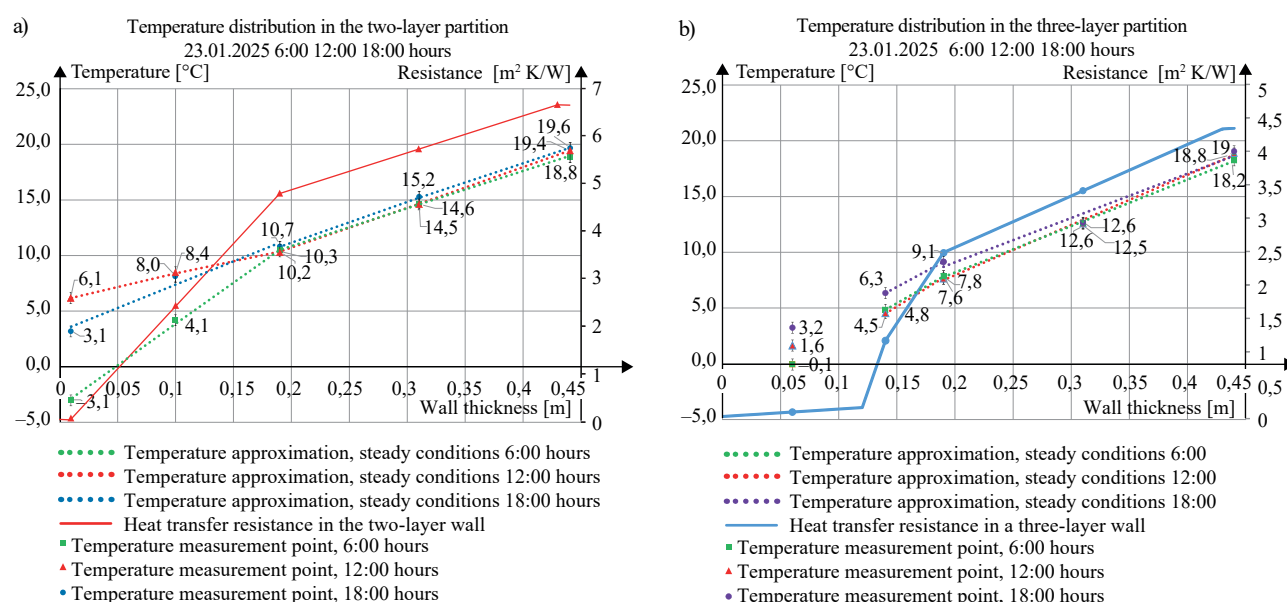


Fig. 5. Comparison of temperature distribution for a) two- and b) three-layer partitions at selected measurement points *Fig. own study*
Rys. 5. Porównanie rozkładu temperatury w przegrodzie: a) dwuwarstwowej; b) trójwarstwowej, w wybranych punktach pomiarowych
Rys. opracowanie własne

Heat transfer resistance values for points in a two- and three-layer partition
Wartość oporu przejmowania ciepła w punktach przegrody dwu- i trójwarstwowej

Own study
Opracowanie własne

Heat transfer resistance/Opór przejmowania ciepła R[m²K/W]									
two-layer wall/ściana dwuwarstwowa					three-layer wall/ściana trójwarstwowa				
measuring points/punkty pomiarowe									
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
0,051	2,420	4,788	5,711	6,774	0,107	1,173	2,489	3,412	4,475

It can be calculated according to the rules governing the heat transfer under steady conditions. The temperature distribution thus calculated is shown in the charts using dashed lines connecting points A3 to A5 and B3 to B5 (Figures 5 and 6).

In the case of the two-layer partition, whose external layer was made of ESP, due to low thermal resistance and low capacity for heat accumulation at the same time (small surface mass), the temperature distribution can also be reproduced as heat transfer under steady conditions. The temperature distribution in the external layer of the three-layer partition cannot be calculated as described above. Due to high thermal conductivity of the clinker brick, and due to high thermal capacity of this layer, the partitions produce a non-linear temperature distribution, which must be calculated under heat conduction conditions in the transient state. [10] In order to correctly calculate the temperature distribution in this layer, it is recommended that the number of the measuring points should be increased appropriately.

Conclusions

The testing results confirmed the usefulness of FBG temperature sensors. The measured lower temperature value of the three-layer wall in the internal layer is an effect of a higher heat transfer coefficient of this partition compared to the two-layer wall. The obtained results are consistent with the theo-

tudzie 10° , podlega niewielkim zmianom ($1-2^\circ C$). Mała wartość gęstości strumienia ciepła i niski gradient temperatury powodują, że rozkład temperatury w tej warstwie jest liniowy i może być obliczony wg reguł przenikania ciepła w warunkach ustalonych. Obliczony w ten sposób rozkład temperatury przedstawiony jest na wykresach liniami przerywanymi łączącymi punkty A3 z A5 i B3 z B5 (rysunki 5 i 6). W przypadku przegrody dwuwarstwowej, której zewnętrzna warstwa została wykonana ze styropianu, ze względu na dużą wartość oporu cieplnego i jednocześnie małą zdolność do akumulacji ciepła (niewielka masa powierzchniowa), rozkład temperatury może również zostać odwzorowany jako przenikanie ciepła w warunkach ustalonych. Rozkład temperatury w zewnętrznej warstwie przegrody trójwarstwowej nie może być obliczany w sposób opisany wcześniej. Duże przewodnictwo cieplne cegły klinkierowej, a także duża pojemność cieplna tej warstwy przegrody powodują nieliniowy rozkład temperatury, który należy obliczać w warunkach nieustalonego przewodzenia ciepła. [10] W celu prawidłowego obliczenia rozkładu temperatury w tej warstwie zaleca się odpowiednio zagęścić punkty pomiarowe.

Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność stosowania czujników temperatury FBG. Zmierzona niższa wartość temperatury ściany trójwarstwowej w warstwie wewnętrznej jest wyni-

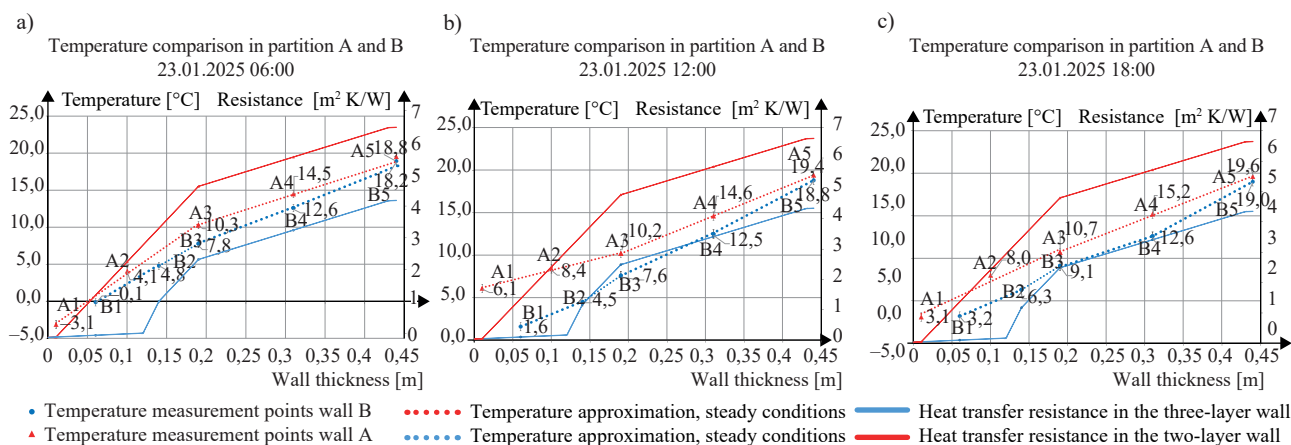


Fig. 6. Comparison of temperature for two- and three-layer partitions at selected measurement points

Rys. 6. Porównanie temperatury przegrody dwu- i trójwarstwowej w wybranych punktach pomiarowych

Fig. own study

Rys. opracowanie własne

retical temperature distribution taking account of the partition structure. The comparison of measurement results with the results of calculations using the finite element method will be the subject of subsequent papers. The use of fiber-optic temperature sensors where Bragg gratings can be embedded at very short distances (of the order of a few millimeters) makes them a very good measuring tool for continuous measurements along the partition thickness. The constructed measuring system enables monitoring the temperature distribution in the partition. Accurate calculations of the heat flux conducted by the partition material are decisive in the design of collector-accumulation walls. Moreover, the knowledge of the actual temperature distribution in external partitions can contribute to proper control of the heating system depending on current environmental conditions.

kiem większego współczynnika przenikania ciepła tej przegrody w porównaniu z przegrodą dwuwarstwową. Otrzymane wyniki są zgodne z teoretycznym rozkładem temperatury uwzględniającym konstrukcję przegrody. Porównanie otrzymanych wyników pomiarów z wynikami obliczeń, wykorzystujących metodę elementów skończonych, będą tematem następnych artykułów.

Zastosowanie światłowodowych czujników temperatury, w których istnieje możliwość nanoszenia siatek Bragga w bardzo małych odległościach (rzędu kilku milimetrów), czyni je bardzo dobrym narzędziem pomiarowym w przypadku ciągłych pomiarów wzdłuż grubości przegrody. Zbudowany system pomiarowy umożliwia monitorowanie rozkładu temperatury w przegrodzie. Dokładne obliczenia strumienia gęstości ciepła przewodzonego przez materiał przegrody mają decydujące znaczenie przy projektowaniu przegród kolektorowo-akumulacyjnych. Ponadto znajomość rzeczywistych rozkładów temperatury w przegrodach zewnętrznych w zależności od zewnętrznych warunków środowiskowych może przyczynić się do właściwego sterowania systemem grzewczym.

Received: 10.02.2025

Revised: 24.03.2025

Published: 24.06.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.03.2025 r.

Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literatura

- [1] Chaluvadi V Naga Bhaskar, Subhradeep Pal, Prasant Kumar Pattnaik, (2021) *Recent advancements in fiber Bragg gratings based temperature and strain measurement*, Results in Optics, Volume 5, 2021, 100130, ISSN 2666–9501. DOI: 10.1016/j.rio.2021.100130
- [2] Bao XY, Liang C. (2012) *Recent progress in distributed fiber optic sensors*. Sensors 2012, 12: 8601–863. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
- [3] Kersey AD. A (1996) *Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology*. Opt. Fiber Technol. 1996; 2: 291–317. <https://doi.org/10.1006/ofte.1996.0036>
- [4] Othonos A, Kyriacos K. (1999) *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Print on Demand: Norwood, MA, USA, 1999; ISBN 089006-344-3. DOI: 10.1063/1.883086
- [5] Ahola S, Lahdensivu J. (2017), *Long term monitoring of repaired external wall assembly*. In Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Building Physics (NSB2017), Trondheim, Norway, 11–14 June 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.635>.
- [6] Marino BM, Muñoz N, Thomas LP. *Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects*. Energy Build., 2018; 174, 452–463. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.008
- [7] Minardo A, Bernini R, Zeni L. (2014), *Distributed Temperature Sensing in Polymer Optical Fiber by BOFDA*. IEEE Photonics Technol. Lett. 2014; 26: 387–390 DOI: 10.1109/LPT.2013.2294878
- [8] Juraszek J, Antonik-Popiołek P. (2021) *Światłowodowe czujniki FBG do monitorowania temperatury przegród budowlanych*. Materials, 14 (5), 1207. <https://doi.org/10.3390/ma14051207>
- [9] Juraszek J. (2020) *Fiber Bragg Sensors on Strain Analysis of Power Transmission Lines*. Materials 2020; 13: 1559 <https://doi.org/10.3390/ma13071559>
- [10] Antonik-Popiołek P. (2021). *Influence of solar radiation to the temperature inside a three-layer partition in winter season*. Acta Sci. Pol. Architectura, 2021; 20 (2), 75–82. DOI: 10.22630/ASPA.2021.20.2.16