

Starzenie się izolacji włóknistych stosowanych w ciepłownictwie i energetyce

Ageing of fibrous insulations used in district heating and power generation

TOMASZ ŻARNOWSKI, TOMASZ WIŚNIEWSKI

Wełna mineralna, zarówno skalna jak i szklana, jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów izolacyjnych w ciepłownictwie i energetyce. Producenci przekonują, że jej właściwości pozostają stałe w czasie, nawet przez wiele lat. Zostało jednak zauważone, że izolacje te zmieniają swój wygląd wraz z upływem czasu. Powstało więc podejrzenie, że ich właściwości cieplne również ulegają zmianie, pomimo że procesy starzenia za tym stojące pozostają nieznane. Podstawowym celem tej pracy było poznanie przyczyn zmian zachodzących w strukturze eksploatowanych izolacji oraz sprawdzenie, czy ich właściwości uległy zmianie. W tym celu zostały przeprowadzone zakrojone na szeroką skalę poszukiwania w bazach artykułów naukowych, zarówno polskich, jak i zagranicznych. Zakres przeprowadzonych badań skupiał się głównie na zjawiskach zachodzących w izolacjach włóknistych oraz w ich środowisku pracy. Polem poszukiwań były głównie bazy artykułów naukowych: BazTech, Scopus oraz ScienceDirect. W dalszej części pracy opisane są wyniki badań przeprowadzonych na próbkach wełny mineralnej pobranej z rurociągów warszawskiego systemu ciepłowniczego (w.s.c.). W podsumowaniu niniejszej pracy, oprócz wniosków z przeprowadzonych prac, znajduje się również propozycja dalszych badań, które powinny zostać podjęte w celu głębszego zrozumienia procesów starzenia i degradacji izolacji włóknistych.

Słowa kluczowe: izolacje włókniste, wełna mineralna, starzenie, degradacja, współczynnik przewodzenia ciepła

Mineral wool, both rock and glass, is one of the most used insulating materials in district heating and power generation. Their producers convince, that its properties remain constant in time, even for many years. It was, however, observed that these insulations change their appearance over time. Because of this there emerged a suspicion that their thermal properties can also be subjected to changes, although the ageing processes responsible for them remain unknown. The main goal of this article was to get to know the reasons of changes happening in the used insulations' structure and to check, if their properties changed. In order to do that there were conducted extensive exploration in scientific articles' databases, both Polish and foreign. The range of research was primarily focused on the phenomena occurring in fibrous insulations and in their environment. The field of research were mainly databases BazTech, Scopus and ScienceDirect. In the further part of the article there are described the results of laboratory tests conducted on samples of mineral wool extracted from the Warsaw's district heating system. In the summary of this article, besides conclusions from performed work, there is also a suggestion of further research, which should be undertaken in order to gain a more profound understanding of the ageing and degradation processes of fibrous insulations.

Keywords: fibrous insulations, mineral wool, ageing, degradation, thermal conductivity

Praca napisana w ramach współpracy Politechniki Warszawskiej i Dalkii Warszawa S.A.

Opiekun techniczny ze strony Dalkii Warszawa S.A.: mgr inż. Ewa Kręcielewska.

Wstęp

Przemysłowe izolacje cieplne były od wielu lat kluczowym elementem w działaniach prowadzących do zwiększania efek-

tywności procesów cieplnych. Stosowano je w różnych formach już od początku rewolucji przemysłowej, lecz dopiero od czasu kryzysu paliwowego w latach 70. XX w. ograniczanie strat ciepła i energochłonności stało się niezbędne, aby zmniejszyć koszty produkcji. Obecnie, ze względów ekonomicznych i środowiskowych, ograniczenie zużycia paliw kopalnych jest niezwykle ważne i jest jednym z głównych celów krajów rozwiniętych, przede wszystkim w Unii Europejskiej. W Polsce, ze względu na dominującą rolę paliw kopalnych w jej gospodarce i wytwarzaniu energii, zwiększanie efektywności procesów cieplnych jest również jedną z podstawowych metod zmniejszania emisji gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla.

Najpopularniejszym materiałem izolacyjnym stosowanym w ciepłownictwie i energetyce w XX w. była wełna mineralna, często wykorzystywana również m.in. w budownictwie. Jej właściwości sprawiają, że nadal jest bardzo atrakcyjna, głównie w zastosowaniach wysokotemperaturowych. Wiele spośród izolacji zamontowanych w latach 80-tych i 70-tych, a nawet wcześniej, wciąż są użytkowane w wielu instalacjach, np. w warszawskim systemie ciepłowniczym, który jest największym tego typu systemem w Unii Europejskiej i działa od lat 50. XX w. [1]. W tak rozległym systemie, składającym się z ponad 1700 km rurociągów ciepłowniczych, ograniczanie strat ciepła jest niezbędne, przede wszystkim ze względów ekono-

mgr inż. Tomasz Żarnowski – Heat-Tech Center Dalkia Warszawa S.A.
prof. nzw. dr hab. inż. Tomasz Wiśniewski – Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska

micznych. Współczynnik przewodzenia ciepła w izolacjach działających przez tak długi okres jest nieznan. Podobnie, brak jest pełnej dokumentacji ich eksploatacji, tj. informacji o awariach, a zwłaszcza zalaniu przez wodę sieciową.

Obecnie, wraz z postępującą wymianą starych rurociągów (izolowanych materiałami włóknistymi) na nowe – budowane z reguły w systemie rur preizolowanych, istotne okazuje się poznanie właściwości starych izolacji po eksploatacji, głównie ich współczynnika przewodzenia ciepła. Podstawowym celem takiego podejścia jest prawidłowe i efektywne (ekonomicznie uzasadnione) zaplanowanie procesu wymiany fragmentów sieci lub izolacji.

Starzenie materiałów jest powszechnie spotykanym procesem w wielu instalacjach przemysłowych. To proces pogarszania się lub utraty pewnych kluczowych właściwości materiału w warunkach eksploatacji wraz z upływem czasu. Wiele takich procesów w instalacjach przemysłowych zostało zauważonych, zbadanych i opisanych. W ciepłownictwie dość dobrze poznanym procesem jest starzenie się pianki poliuretanowej (zwiększanie się współczynnika przewodzenia ciepła jest wynikiem dyfuzji gazów z wnętrza komórek pianki do otoczenia i zastąpienie ich powietrzem, które ma gorsze właściwości izolacyjne [2]). Istnieje jednak wiele procesów starzenia, które do tej pory nie zostały zbadane. Jednym z takich procesów jest starzenie się izolacji z materiałów włóknistych stosowanych w ciepłownictwie. Izolacje z tego materiału użytkowane są w trudnych warunkach, zmieniających się w trakcie pracy oraz w szerokim zakresie temperatury. W ich otoczeniu często obecna jest również woda, która może spenetrować izolację. Poddawane są też obciążeniom mechanicznym. Wszystkie spośród tych czynników mogą przyspieszać starzenie izolacji z wełny mineralnej albo samodzielnie sprawiać, że taka izolacja staje się mniej efektywna. Mogą one również wzajemnie wzmacniać swoje oddziaływania, co dodatkowo utrudnia poznanie mechanizmów ich działania. Dlatego też należy przeanalizować warunki pracy izolacji ciepłowniczych i wykonać odpowiednie badania, a następnie wyciągnąć całościowe wnioski.

Czynniki wpływające na właściwości wełny mineralnej

Istnieje szereg czynników, które mogą mieć wpływ na właściwości wełny mineralnej. Są one związane z warunkami eksploatacji, takimi jak: podwyższona temperatura, obecność wody i obciążenia mechaniczne.

Pomimo tego, że wpływ pojedynczych czynników wymienionych w dalszej części pracy może wydawać się nieznaczący, ich wspólne oddziaływanie może być istotne, szczególnie w odpowiednich okolicznościach. Może dojść nawet do stanu zniszczenia izolacji, które w skrajnych sytuacjach uwidacznia się w formie „sproszkowania” jej struktury. W tej części artykułu chciałoby się skupić na zjawiskach występujących w izolacjach z wełny mineralnej, które mogą wpłynąć na pogorszenie jej właściwości. Pozwoli to na bardziej dogłębne przeanalizowanie wyników badań zaprezentowanych w dalszej części pracy oraz na sformułowanie uzasadnionych wniosków.

Pierwszym czynnikiem, który zostanie przeanalizowany jest woda, a dokładniej jej działanie na izolację podczas eksploatacji. W pracach [3] oraz [4] można przeczytać o wpływie wody na właściwości cieplne izolacji. Jej działanie opiera się na przyleganiu do włókien, przede wszystkim w miejscach styku włókien. Ze względu na większy współczynnik przewodzenia ciepła wody niż materiału włókien, tworzą się mostki cieplne. Oprócz tego, duże ilości wody powodują łączenie się obszarów nią objętych, co umożliwia ruch wody wewnątrz izolacji. Połączenie tych procesów może spowodować nawet kilkukrotne zwiększenie współczynnika przewodzenia ciepła. Aby temu zapobiec dodaje się środek hydrofobowy, który jest zawarty w spoiwie organicznym. Wełna jest nim spryskiwana w procesie produkcji. Taki środek hydrofobowy utrudnia zwilżanie powierzchni nim pokrytych przez zwiększenie kąta zwilżania. Dzięki temu trudniejsze jest również zwilżenie punktów styku włókien, co znacząco ogranicza tworzenie się mostków cieplnych. Woda jest obecna w takiej izolacji w niewielkich ilościach, głównie na środkowych częściach włókien.

Oprócz tego, istnieją również inne metody przeciwdziałania penetracji izolacji przez wodę. Do metod takich należy m.in. stosowanie warstw ochronnych, które bezpośrednio blokują dostęp wody do izolacji. Rurociągi ciepłownicze są również umieszczone w betonowych kanałach ciepłowniczych, które oddzielają je od otoczenia. Niestety takie kanały są zalewane wodami gruntowymi, zarówno w całości, jak i częściowo. Może to prowadzić do kompletnego nasiąknięcia wełny mineralnej. Zjawisko to jest możliwe przy całkowitym zalaniu kanału nawet przy wartościach temperatury powyżej 200°C [5], [6], które są osiągnięte w rurociągach parowych, spotykanych w niektórych systemach ciepłowniczych (w w.s.c. czynnikiem grzewczym jest gorąca woda o temperaturze roboczej obecnie

do 124°C). Proces namakania jest z początku bardzo szybki, lecz całkowite namoknięcie może nastąpić nawet dopiero po kilku dniach [6]. Proces wysychania również trwa wiele dni, nawet jeśli rurociąg, na którym znajduje się izolacja, jest gorący. Zjawisko takie zarówno powoduje znaczne straty ciepła w okresie zalania kanału, ale również wystawia wełnę mineralną oraz jej składniki na działanie wody. Izolacja nasiąknięta wodą wielokrotnie zwiększa swoją masę, co prowadzi do jej większego osiadania na rurociągu. Efektem tego jest znaczne zwiększenie współczynnika przewodzenia ciepła izolacji oraz jej deformacja i uszkodzenie mechaniczne.

Częste zalewanie kanałów ciepłowniczych może również doprowadzić do penetracji wełny mineralnej przez materiał zewnętrzny, taki jak: piasek, żwir, kamienie czy metalowe odpryski. Elementy takie mogą zarówno zwiększać przewodność cieplną izolacji przez samą swoją obecność, działając jak mostki cieplne, albo wpływać na nią w inny sposób, np. w połączeniu z wibracjami, których wpływ będzie opisany w dalszej części pracy. Woda gruntowa, zalewająca kanały może również zawierać związki chemiczne, które bywają w pewnym stopniu szkodliwe dla składników izolacji.

Oprócz wód gruntowych, innym źródłem wody wewnątrz kanałów ciepłowniczych są awarie sieci. Jest to problem obecny we wszystkich systemach ciepłowniczych i choć z roku na rok awarii jest coraz mniej, wciąż jest to nie bez znaczenia. Każdej godziny tracone jest z sieci wiele ton wody, z czego znaczna część trafia bezpośrednio do kanałów ciepłowniczych. Pokazuje to, że izolacje ciepłownicze są regularnie i przez długi czas wystawiane na działanie wilgotnego środowiska, w tym wody.

Jak już zostało wcześniej wspomniane, wełna mineralna, oprócz samych włókien, skalnych lub szklanych, zawiera również spoiwo organiczne, mające na celu utrzymanie struktury wełny. Spoiwem tym jest z reguły żywica fenolowo-formaldehadowa z dodatkiem środka hydrofobowego [7]. W normalnych warunkach spoiwo równomiernie pokrywa całą powierzchnię włókien oraz tworzy struktury pomiędzy nimi, np. błony. W pracy [8] opisana została pogorszona hydrofobowość wełny mineralnej. Podczas obserwacji włókien wełny pod mikroskopem elektronowym zauważono, że spoiwa jest znacznie mniej niż można by się spodziewać. Wyjaśnieniem tego zjawiska może być częściowa depolimeryzacja bądź degradacja spoiwa w wyniku hydrolizy. Depolimeryzacja

polega na odłączaniu się od polimeru pojedynczych monomerów, natomiast degradacja to odłączenie się od długiego łańcucha polimerowego krótszych łańcuchów polimerowych. Skrócenie głównych łańcuchów polimerowych spoiwa prowadzi do rekombinacji ich struktury, która ma inne właściwości: spoiwo staje się bardziej sztywne i kruche, przez co łatwiej się odczepia od włókien oraz ma gorszą stabilność termiczną i może dojść do jego rozkładu termicznego w niższej niż zwykle temperaturze. Oprócz tego, depolimeryzacja prowadzi do powstawania grup –OH, które zmniejszają hydrofobowość wełny. Dzieje się tak, gdyż grupy te przyciągają wodę.

Pewnym potwierdzeniem tezy o zmianach zachodzących w samym spoiwie jest kolor postarzonych izolacji z wełny mineralnej. Normalnie wełna mineralna używa pierwotny kolor w wyniku polimeryzacji spoiwa w komorze polimeryzacyjnej w trakcie procesu produkcji. Proces ten ma również na celu poprawę właściwości spoiwa. Kolor wełny mineralnej zależy właśnie od użytego spoiwa. Kolor wełny pobranej z sieci ciepłowniczej różnił się znacząco od tego normalnie spotykanego w produktach nowych. Obserwowano również znaczące różnice wewnątrz pojedynczych egzemplarzy, gdzie wyraźne były strefy części i rzadziej zalewane przez wodę o różnych kolorach (ślady zalewania części dotyczyły dolnych części izolacji niż górnych). Zmiany we właściwościach spoiwa mogą prowadzić zarówno do większej podatności na obciążenia mechaniczne, a więc większe zmiany gęstości, od której zależy przewodność cieplna, jak i zmniejszenia hydrofobowości, przez co woda w stanie ciekłym ma większy wpływ na przewodność cieplną izolacji. Obydwa te mechanizmy w znaczący sposób mogą wpłynąć na efektywność izolacji.

Innym czynnikiem działającym na izolację cieplną podczas ich pracy są różnego rodzaju obciążenia mechaniczne. Mają one zróżnicowany charakter oraz źródła, poczynając od rozszerzalności cieplnej materiału izolacji i rurociągu, przez osiadanie pod wpływem własnego ciężaru, po wibracje z otoczenia.

Pierwsze wymienione wyżej źródło obciążeń mechanicznych, wydłużenia cieplne, działa na izolację w następujący sposób: w wyniku różnic we współczynnikach rozszerzalności cieplnej rurociąg wydłuża się wraz ze wzrostem temperatury znacznie bardziej niż izolacja, co powoduje „ślizganie się” rury w stosunku do izolacji. Sprawia to, że izolacja się odczepia od rurociągu i jest bardziej podatna na osuwanie czy

tworzenie tzw. „zwisów”, czyli kieszeni powietrznych tworzonych przez dolną część izolacji, która się odczepiła od rurociągu.

Na izolację ciepłowniczą działają również obciążenia wynikające z ich własnego ciężaru oraz warstwy ochronnej. O ile gęstość samego materiału wełny mineralnej jest dość niewielka, to już w przypadku nasiąknięcia wodą ich ciężar wzrasta wielokrotnie ze względu na znacznie większą gęstość wody, która wypełnia puste przestrzenie wewnątrz izolacji. Gęstość izolacji ulega zwiększeniu przy odpowiednio dużym obciążeniu i po pewnym czasie może się utrwalić, tzn. po zdjęciu obciążenia gęstość pozostaje podwyższona. Dzieje się tak ze względu na trwałe odkształcenia włókien, a nawet ich łamanie [9]. Również płaszcze ochronne, które często były wykonywane z cementu, a wcześniej z azbestu, mogły wywierać znaczny nacisk na izolację cieplną.

Innym czynnikiem wpływającym mechanicznie na strukturę izolacji mogą być wibracje. Ich rola może się ograniczać do wzmaganie innych procesów, zarówno makroskopowo, np. zwiększania osiadania izolacji pod wpływem ciężaru, jak i mikroskopowo, np. poprzez wpływ na odpadanie zdegradowanego spoiwa, które ma gorsze właściwości mechaniczne niż nowe. Obydwa te rodzaje wpływu wibracji mają charakter pomocniczy przy innych czynnikach. Jednakże w pracy [10] został opisany proces, który może mieć miejsce w obecności wibracji o odpowiednim natężeniu i częstotliwości. Składa się on z kilku etapów, które zachodzą wraz z upływem czasu w zależności od wibracji obecnych w otoczeniu wełny. Niektóre spośród tych etapów to wygładzenie powierzchni wełny, powstawanie lokalnych zagłębień, sproszkowanie, a następnie ogólne zniszczenie włókien wełny. Pokrywa się to częściowo z obserwacjami z Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej, gdzie spotykano się z izolacją w stanie sproszkowanym, lecz nieznaną była tego przyczyna. W dużym stopniu na wzmocnienie działania wibracji w izolacjach włókniстых może wpływać obecność ciał obcych, szczególnie małych, twardych obiektów, takich jak: piasek, kamienie, żwir czy metalowe odpryski. Tego typu obiekty, wibrując, przemieszczają się w izolacji, niszczą włókna wokół siebie i tworzą puste przestrzenie. Również obecność wody w stanie ciekłym może wzmocniać wpływ wibracji. Jak zostało to stwierdzone, aby wibracje mogły odegrać znaczącą rolę w degradacji wełny mineralnej, muszą mieć one odpowiednio wysokie natężenie. W otoczeniu izolacji istnieje

wiele źródeł wibracji o różnej sile, poczynając od pojazdów poruszających się po powierzchni (samochody, tramwaje, pociągi), poprzez urządzenia działające w sieci (pompy), aż po czynnik grzewczy płynący wewnątrz rur. Zarówno natężenie, jak i częstotliwość tych wibracji powinny być zmierzone zanim będzie można określić znaczenie ich oddziaływania na izolację ciepłowniczą. Oczywiście, izolacje działające w przemyśle bądź energetyce są narażone na znacznie więcej źródeł wibracji, co należy wziąć pod uwagę przy ewentualnych dalszych rozważaniach na ten temat w przyszłości.

Podczas rozważań dotyczących żywotności izolacji włókniстых należy zwrócić uwagę na wpływ człowieka na działanie izolacji. Wszędzie tam, gdzie proces produkcji/montażu nie jest w pełni zautomatyzowany istnieje ryzyko popełniania błędów przez ludzi. Niestety, w przypadku sieci ciepłowniczych błędy ludzkie mogą się ujawnić dopiero po wielu latach eksploatacji lub nie ujawniać nawet przez cały okres użytkowania i powodować wówczas podwyższone straty ciepła i sprzyjać degradacji materiału izolacji. Możliwe błędy ludzkie mogą być związane z projektowaniem kanałów ciepłowniczych, np. poprzez poprowadzenie kanałów w miejscach, gdzie poziom wód gruntowych jest zbyt wysoki [11], co może prowadzić do częstego i długotrwałego ich zalewania, a więc długotrwałego wystawiania składników izolacji na szkodliwe działanie wody. Innym błędem na tym etapie bywa też zastosowanie nieodpowiedniej izolacji do danych warunków pracy, co może wpłynąć na ich gorszą efektywność podczas eksploatacji oraz szybsze starzenie. Błędy ludzkie zdarzają się również podczas montażu, który im sprzyja. Do możliwych błędów na tym etapie należą m.in. złe składowanie, niedostateczne zabezpieczenie przed wilgocią, zły dobór płaszczy ochronnych (ciężkie płaszcze nakładane „na mokro”), przerwy pomiędzy elementami izolacji, penetracja izolacji przez elementy zewnętrzne (piach, kamienie itp.). Mogą one prowadzić do gromadzenia się wody wewnątrz izolacji, co wpływa na spoiwo organiczne wełny, a także do zwiększenia obciążeń mechanicznych czy wpływu wibracji. Tego typu błędy powinny zostać wykryte odpowiednio wcześniej, poprzez regularne inspekcje oraz odpowiedni odbiór instalacji ciepłowniczych, jednak w ciągu kilkudziesięciu lat nie zawsze było to odpowiednio nadzorowane. Błędy ludzkie mogą w znacznym stopniu wpłynąć na efektywność izolacji po wielu latach użyt-

kowania i powinno się im przeciwdziałać na każdym etapie.

Pobieranie próbek

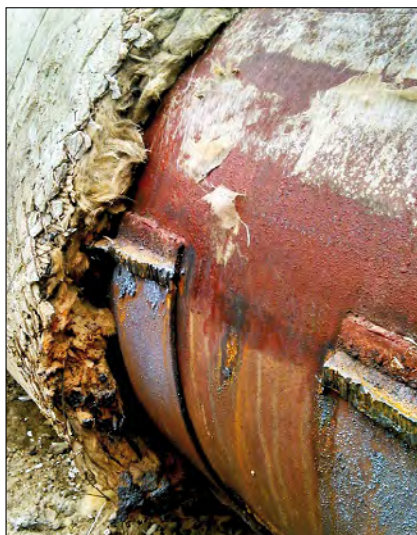
W celu sprawdzenia po wielu latach eksploatacji właściwości izolacji rurociągów ciepłowniczych należałoby pobrać możliwie dużą liczbę próbek. Próbkę tę powinny być pobrane z fragmentów rurociągów w różnym wieku, aby móc stworzyć zależność właściwości wełny mineralnej (głównie współczynnika przewodzenia ciepła) od czasu. Izolacje te powinny być eksploatowane w możliwie podobnych warunkach. Warunek ten nie zawsze jest spełniany, ze względu na awarie i zalania wodami gruntowymi, które na różnych odcinkach sieci ciepłowniczej zdarzają się z różną częstotliwością.

Proces pobierania próbek można podzielić na kilka etapów: wybór odcinka rurociągu ciepłowniczego, wybór fragmentu izolacji o ciągłej strukturze, pobranie próbki oraz przygotowanie jej do badań. Przy wyborze odcinka największą rolę odgrywa wiek izolacji, która się na nim znajduje. Wybranie odpowiedniego fragmentu jest niezwykle istotne, głównie ze względu na występujące w sieci ciepłowniczej ubytki w wełnie mineralnej. Na starszych odcinkach rurociągów, wybranych do pobrania próbek, zaobserwowano zostały miejscowe braki w izolacji (rys. 1), co wymusiło uważne wybranie fragmentów do dalszych badań. Kluczowe były tutaj wymiary próbek potrzebnych do badania przewodności cieplnej na aparacie płytowym, które musiały mieć wymiary poprzeczne 10x10cm. Wraz z potrzebą wykonania innych badań wymuszało to odpowiednio większe rozmiary pobieranych próbek. Ostatecznie pobierane były pasy wełny o szerokości 30cm z obwodu rurociągu, z których wycinano próbki górne, boczne i dolne, bądź fragmenty o wymiarach 30x30cm z górnej, bocznej i dolnej części rurociągu. Pobranie izolacji z różnych stron rurociągu było uzasadnione podejrzeniem, że różne części izolacji mogą być poddawane zróżnicowanym warunkom pracy i stopień zmian ich właściwości może być różny.

Oprócz wspomnianych miejscowych braków wełny na niektórych starszych rurociągach, zaobserwowano zostały również inne zmiany w strukturze i wyglądzie wełny mineralnej. Wełna pobrana po wieloletniej eksploatacji miała kolor znacznie różniący się od wełny nowej. Z reguły zmiany te dotyczyły całości izolacji (rys. 1), lecz w niektórych przypadkach widoczne były znaczące różnice pomiędzy częściami



Rys. 1.
Braki w izolacji włóknistej na rurociągu
Fig. 1. Gaps in fibrous insulation on a pipeline



Rys. 2.
Różnice w kolorze różnych części wełny mineralnej
Fig. 2. Differences in colour of different parts of mineral wool

górną i dolną izolacji rurociągu (rys. 2). Jak już zostało to wcześniej wyjaśnione, kolor wełny mineralnej zależy w znacznym stopniu od zawartego w niej spoiwa organicznego, którego rolą jest utrzymanie struktury wełny. Zmiana koloru wełny może wskazywać zarówno na zmniejszoną zawartość spoiwa, jak i zmiany w nim zachodzące pod wpływem upływu czasu i warunków eksploatacji.

Innym przykładem zmian zachodzących w izolacjach włóknistych używanych w ciepłownictwie jest całkowita destrukcja struktury i sproszkowanie starszych izolacji z wełny szklanej (rys. 3). Możliwym wyjaśnieniem, które zostało opisane w pracy [8], jest częściowa krystalizacja włókien wełny szklanej wraz z upływem czasu, co



Rys. 3.
Wełna szklana w stanie sypkim
Fig. 3. Glass wool in loose state

doprowadza do zwiększenia ich kruchości. Tak zdegradowane włókna mogą z większą łatwością ulec złamaniu pod wpływem obciążeń mechanicznych opisanych wcześniej. Badanie przewodności cieplnej takich próbek jest dość problematyczne, ze względu na dużą zależność współczynnika λ od gęstości izolacji. Współczynnik ten dla izolacji w stanie sypkim zależałby w dużym stopniu od sposobu nasypiania sproszkowanych i potamanych włókien do aparatu pomiarowego. Z tego też powodu badania takie dla tych próbek zostały zaniechane.

Po pobraniu z rurociągów sieci ciepłowniczej, próbki zostały przygotowane do badań. W tym celu nastąpił ich podział na fragmenty o wymiarach poprzecznych 10x10cm, po 3 dla każdej ze stron rurociągu, a następnie zważone i przekazane do badań laboratoryjnych.

Wyniki badań laboratoryjnych

W celu sprawdzenia właściwości eksploatowanych izolacji włóknistych wykonane zostały 3 rodzaje testów: obserwacja pod skaningowym mikroskopem elektronowym SEM, badania sorpcji wilgoci w komorze klimatycznej oraz pomiary współczynnika przewodzenia ciepła na aparacie płytowym. Wszystkie badania zostały wykonane w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Na rys. 4 pokazano posegregowane próbki przeznaczone do badań.

Głównym celem obserwacji mikroskopowych było porównanie próbek starych,

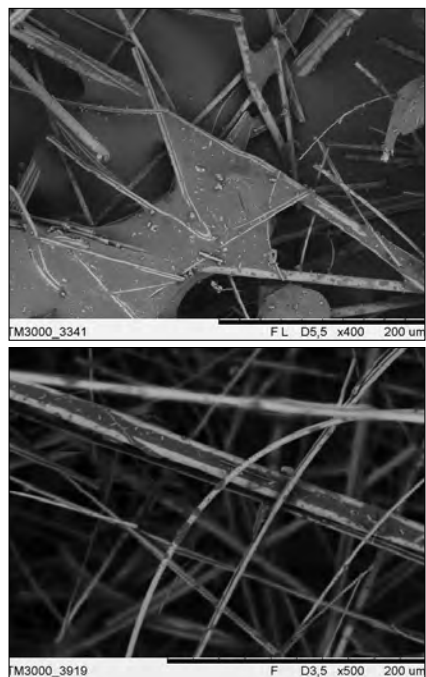
Rys. 4
Przykłady próbek przygotowanych do badań
Fig. 4. Examples of samples prepared for tests



pobranymi z sieci ciepłowniczej, z egzemplarzami nowej wełny. W porównaniu tym szczególnie uwaga została zwrócona na stan spoiwa, ale także na wygląd samych włókien. Oprócz tego szukano potwierdzenia działania czynników wymienionych w poprzedniej części pracy.

Na rys. 5 przedstawiono przykłady nowej wełny. Jak widać, występują w nich duże ilości spoiwa organicznego. Przyjmują one różne formy, które można znaleźć w starej wełnie w bardzo małych ilościach, bądź wcale. Są to np. błony pomiędzy znacznie oddalonymi włóknami czy też kropki, które są przyklejone do środkowych części włókien. Często zdarzają się włókna ułożone równolegle, pomiędzy którymi znajduje się warstwa spoiwa, łącząca je. Ogólnie nowe włókna są pokryte cienką warstwą spoiwa, która jest trudno dostrzegalna ze względu na swoją jednolitość.

W trakcie obserwacji zauważono liczne przykłady zgięć i złamań włókien. Przykłady takich włókien są widoczne na rys. 6. Po lewej stronie są przedstawione włókna, które są zgięte mimo braku zewnętrznych obciążeń. Mechanizm takiego zginania włókien został opisany wcze-

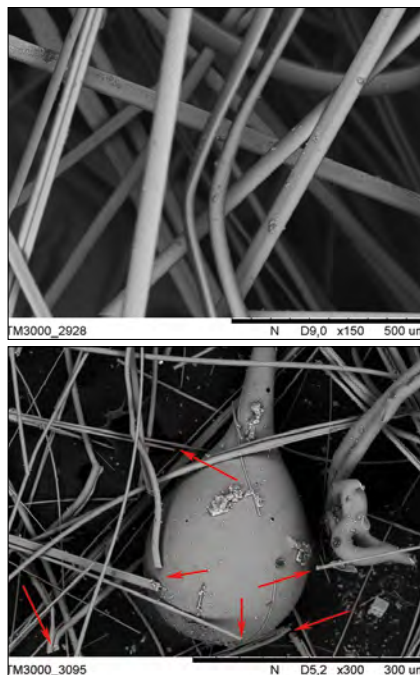


Rys. 5.
Struktury spoiwa w wełnie nowej
Fig. 5. Binder structures in a new wool

śniej. Natomiast po prawej stronie rys. 6 widać „kropkę” materiału izolacji, powstałą w procesie produkcji, a także liczne złamane, a nawet skruszone włókna wokół niej (czerwone strzałki). Niewykluczone, że do takiego stanu rzeczy doprowadziły vibracje, których możliwe działanie zosta-

ło opisane wcześniej. Obydwa te przykłady pokazują, że postarzona wełna może mieć pogorszone właściwości mechaniczne.

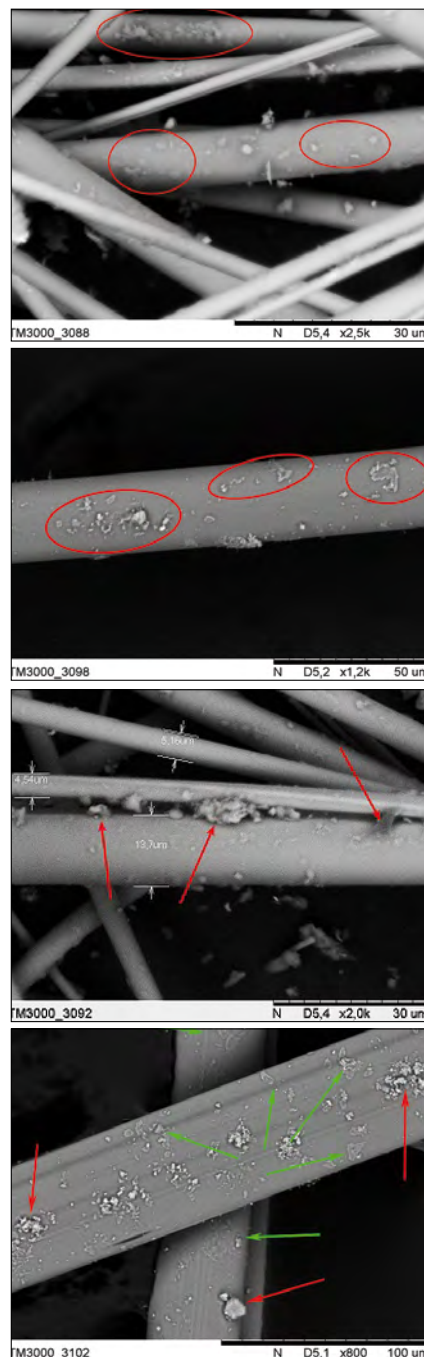
Na rys. 7 przedstawiono różne przykłady degradacji spoiwa organicznego. Spoiwo ma tendencję do łuszczenia się (czerwone okręgi na górnych zdjęciach), tzn. odcepienia się warstw lub płatków spoiwa od powierzchni włókien. Może być



Rys. 6.
Zgięcia i złamania włókien
Fig. 6. Flexions and fractures of fibres

to efekt pogorszenia się właściwości mechanicznych spoiwa, przede wszystkim większej sztywności oraz kruchości. Spoiwo takie traci swoją lepkość i może odpaść od włókna np. pod wpływem vibracji. Innym przykładem degradacji spoiwa jest tworzenie się „grudek”, widocznych na dolnych zdjęciach (czerwone strzałki). Mogą one powstawać ze skruszonego materiału spoiwa, który zlepia się w takie struktury, szczególnie w miejscach styku włókien, ale także w połączeniu z materiałem zewnętrznym albo sproszkowanym materiałem samych włókien. Na zdjęciu po prawej stronie na dole widoczne są obydwa wspomniane typy struktur zdegradowanej wełny.

Opisywane sytuacje spotykane były w zdecydowanej większości zbadanych próbek wełny postarzonej, nie były jednak jedynymi. Oprócz zauważalnej różnicy w ilości spoiwa organicznego w próbkach nowych i starych zauważone zostały także różnice w ilości spoiwa pomiędzy poszczególnymi częściami tych samych izolacji, tzn. w niektórych przypadkach większe



Rys. 7.
Przykłady zdegradowanego spoiwa
Fig. 7. Examples of degraded binder

ilości spoiwa były obecne w częściach górnych i bocznych niż w dolnych izolacji, co może wskazywać na częściowe zalewanie kanałów i wpływ wody na spoiwo. Również tego typu różnice były widoczne między izolacjami z rurociągów powrotnych i zasilających – większe ilości spoiwa z reguły występowały w izolacjach powrotnych. Może to wskazywać na wpływ temperatury na degradację spoiwa, chociaż w mniejszym stopniu niż wpływ wody.

Drugim rodzajem badań, które zostały przeprowadzone w celu poznania właści-

wości wełny mineralnej, były badania sorpcji wilgoci. W celu ich przeprowadzenia użyta została komora klimatyczna z regulowaną wilgotnością powietrza. Próbkę wełny została najpierw dokładnie wysuszone w piecu, a następnie zważone. Kolejno włożone do komory, w której była zmieniana wilgotność powietrza co 10% do maksymalnej wartości 90%. Przed każdą zmianą wilgotności powietrza próbki były ponownie ważone w celu obliczenia ich zawartości powietrza. Badania zostały przeprowadzone w temperaturze 20°C oraz 40°C.

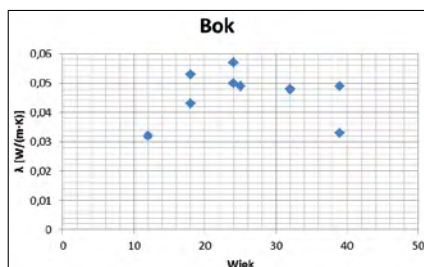
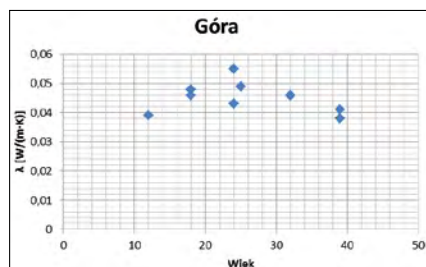
Wartości sorpcji dla większości próbek były bardzo niskie i nie przekraczały 1% zawartości wilgoci przy wilgotności względnej powietrza 90%, co jest dobrym wynikiem dla wełny nowej. Tylko dwie próbki wykazały znacznie większą sorpcję, wynoszącą do 3-4%. Może być to następstwem obecności zanieczyszczeń wewnątrz próbek, takich jak piach czy żwir. Zwiększają one znacząco sorpcję wilgoci z powietrza, ze względu na to, że same znacznie bardziej wchłaniają wilgoć, podczas gdy włókna wełny mają na swojej powierzchni środek hydrofobowy. Pokazuje to, że nawet niewielka ilość zanieczyszczeń może znacząco wpłynąć na bieżące właściwości wełny mineralnej.

Trzecim i ostatnim przeprowadzonym badaniem był pomiar współczynnika przewodzenia ciepła izolacji na aparacie płytowym z czujnikami strumienia ciepła. Średnia temperatura badań wynosiła 40°C, a pojedynczy pomiar trwał około doby. Do czasu powstania tej pracy zbadać i opisać 35 próbek. Na rys. 8 pokazane są wyniki tych badań. Na osi poziomej znajduje się czas eksploatacji w latach, natomiast na osi pionowej współczynnik przewodzenia ciepła, W/mK.

Na wykresie po lewej stronie znajdują się wszystkie wyniki uzyskane z pomiarów. Jak można zauważyć, niektóre spośród starszych próbek mają bardzo niską przewodność cieplną. Są to części górne i boczne najstarszych badanych fragmentów izolacji. Możliwe wytłumaczenie

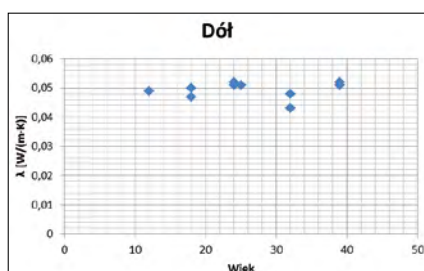
brzmi następująco: izolacje stare, o wieku powyżej 30 lat, które jeszcze są obecne w sieci ciepłowniczej, nie były wystawione na niesprzyjające warunki pracy i zachowały częściowo swoje pierwotne właściwości. Mogły nie zostać wymienione ze względu na mniejszą awaryjność odcinków, na których się znajdowały, przez co były rzadziej zalewane. Pokazuje to, że izolacje włókniste są w mniejszym stopniu

i zaprezentuje oddzielnie wyniki ich dotyczące. Zostało to przedstawione na rys. 9. Obserwując wykresy, można zauważyć podobieństwa pomiędzy próbkami z górnych i bocznych części izolacji. W obu przypadkach maksymalna wartość współczynnika przewodzenia ciepła jest osiągana przez próbki w wieku około 25 lat, podczas gdy wartości tego współczynnika dla starszych izolacji mają niższą



Rys. 9. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wieku badanych próbek dla poszczególnych części izolacji

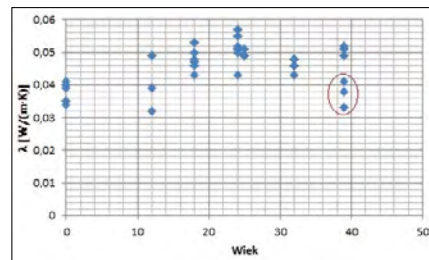
Fig. 9. Dependency of thermal conductivity on the tested samples' age for various parts of insulations



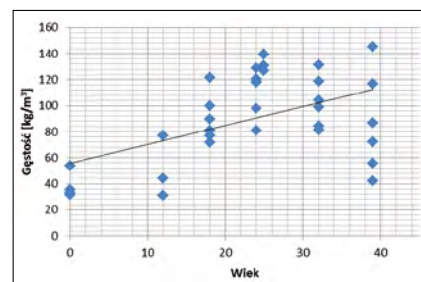
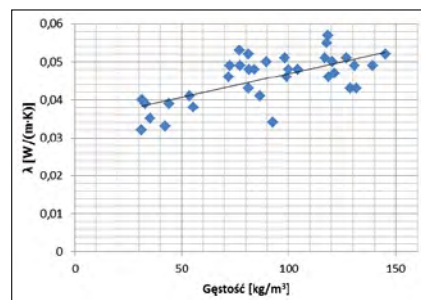
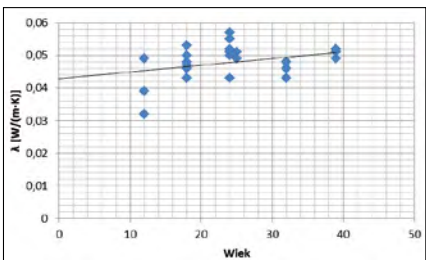
podatne na działanie czasu, lecz w większym stopniu na ich właściwości po latach użytkowania mają wpływ warunki eksploatacji. Należy zwrócić uwagę na to, że dolne części tych najstarszych izolacji mają już dość wysoką wartość współczynnika przewodzenia ciepła, co może wskazywać na częściowe zalewanie kanałów, bądź inne czynniki na nie wpływające. Po usunięciu tych nietypowo małych wartości, zaznaczonych czerwonym okręgiem, wyniki wykazują trend nieznacznie rosnący. Trzeba tutaj jednak pamiętać o tym, że wyniki dla aparatu płaskiego są znacznie niższe niż dla aparatu rurowego, oddającego rzeczywiste warunki pracy takich izolacji. Różnice w wynikach mogą sięgać 25%.

Różnice pomiędzy poszczególnymi częściami badanych izolacji są bardzo dobrze widoczne, jeśli się rozdzieli

wartość. Wytłumaczenie tego zjawiska zostało przedstawione wcześniej. Z drugiej strony dolne części izolacji zdjętych z rurociągów ciepłowniczych szybko osiągnęły wysokie wartości współczynnika przewodzenia ciepła, które utrzymywały się dla wszystkich próbek. Potwierdza to



Rys. 8. Wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła
Fig. 8. Results of thermal conductivity measurements



Rys. 10. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości oraz gęstości od wieku badanych próbek

Fig. 10. Dependency of thermal conductivity on density and density on the tested samples' age

przytoczoną wcześniej hipotezę o częściowym zalewaniu kanałów.

Na koniec rozważań o przewodności cieplnej badanych próbek warto przywrócić się ich gęstości. Na rys. 10 przedstawiono wyniki jej pomiaru. Można łatwo zauważyć, że współczynnik przewodzenia ciepła rośnie wraz z gęstością (lewy wykres), co pozostaje w zgodzie z teorią [3]. Interesujący jest jednak drugi wykres, na którym można zobaczyć zmiany gęstości w czasie eksploatacji. Trend zmian gęstości jest rosnący, lecz dla najstarszych próbek widoczne są bardzo duże rozbieżności. Jasno to pokazuje, że różne części izolacji były poddawane różnym warunkom eksploatacji oraz działały na nie różne czynniki. Zdać się to potwierdzać hipotezę, że znacznie większy wpływ na właściwości izolacji z wełny mineralnej mają warunki, w jakich te izolacje są eksploatowane, niż czas użytkowania.

Podsumowanie

Proces starzenia izolacji z wełny mineralnej jest zjawiskiem bardzo skomplikowanym, co było przewidywane w momencie podjęcia prac nad tym zagadnieniem. W wyniku obserwacji oraz analizy wyników badań można dojść do wniosku, że na zmianę właściwości takich izolacji dominującego wpływu nie ma czas eksploatacji, lecz warunki, w jakich się one znajdują. Szczególnie duże znaczenie zdaje się mieć woda, zwłaszcza w stanie ciekłym. Podstawowym sposobem utrzymywania przewodności cieplnej wełny mineralnej na odpowiednio niskim poziomie powinno być więc zapobieganie dostawianiu się wody do jej wnętrza. Nie jest to jednak jedyny czynnik, który może mieć wpływ na właściwości cieplne izolacji, gdyż degradacja jej spoiwa następuje pod wpływem podwyższonej temperatury pracy. Natomiast zwiększenie jej gęstości spowodowane jest różnego rodzaju obciążeniami mechanicznymi, których działanie może być wzmacniane przez wibracje, mogące wpływać dodatkowo na same włókna wełny.

Po uważnej analizie wszystkich wyników można zaproponować wstępny model fizyczny procesu starzenia, bądź degradacji izolacji z wełny mineralnej. Trzeba jednakże mieć na uwadze, że jest to propozycja wstępna, wymagająca potwierdzenia w dalszych badaniach.

Wełna mineralna pracuje w środowisku, gdzie istnieje duże ryzyko występowania wody w stanie ciekłym, zarówno w wyniku zalewania wodą gruntową, jak i awarii sieci ciepłowniczej. Woda ta

wpływa w głównej mierze na spoiwo organiczne, zazwyczaj żywicę fenolowo-formaldehidową, poprzez m.in. hydrolizę, która powoduje jego częściową depolimeryzację lub degradację. Spoiwo takie staje się bardziej sztywne i kruche, przez co łatwiej się odłącza od włókien wełny. Ma to podwójny skutek; po pierwsze struktura wełny zostaje osłabiona, co prowadzi do jej łatwiejszego osiadania, a po drugie, ze względu na mniejszą ilość środka hydrofobowego, który jest normalnie obecny w spoiwie, wełna zwiększa swoją przewodność cieplną w obecności wilgoci, z powodu tworzenia się większej liczby mostków cieplnych w miejscach styku włókien. Przez cały okres użytkowania wełna jest poddawana obciążeniom mechanicznym, zarówno pochodzącym od ciężaru samej wełny, jak i płaszcza ochronnego. Ciężar wełny może zostać zwielokrotniony przez jej nasiąknięcie wodą. W wyniku tych obciążeń wełna zwiększa swoją gęstość, co prowadzi do zwiększenia jej przewodności cieplnej. Pewien, nieokreślony jeszcze co do wielkości, wpływ na osiadanie wełny, ale także na odpadanie spoiwa od włókien, mogą mieć wibracje, powszechnie obecne w miejskim systemie ciepłowniczym. Wszystkie te czynniki mogą się wzajemnie wzmacniać, a ich efekty bywają zwielokrotnione błędami popełnionymi zwłaszcza podczas projektowania sieci oraz montażu izolacji.

Przedstawiony model fizyczny jest próbą jakościowego opisu zagadnienia starzenia się izolacji z wełny mineralnej i wymaga on potwierdzenia w dalszych badaniach. Kontynuacja badań umożliwi stworzenie modelu ilościowego. Posiadając taki kompletny model można podejmować odpowiednie kroki, mające na celu przeciwdziałanie starzeniu i degradacji tego typu izolacji. Badania te muszą być przeprowadzone na odpowiednio dużej liczbie próbek.

Powinny one obejmować w pierwszej kolejności kontynuację badań współczynnika przewodzenia ciepła na aparacie płaskim w celu potwierdzenia różnic właściwości poszczególnych części izolacji. Potrzebne jest również zbadanie pewnej liczby próbek na aparacie rurowym, aby stworzyć zależność pomiędzy wynikami dla aparatu płaskiego i rurowego, co pozwoliłoby przełożyć uzyskane wyniki na efektywność izolacji na rzeczywistym rurociągu. W dalszym ciągu należy kontynuować obserwacje pod mikroskopem elektronowym SEM, głównie w celu kontroli stanu spoiwa w poszczególnych częściach izolacji. Niezwykle istotne jest zba-

danie wpływu różnych czynników na spoiwo wełny, głównie wody (hydroliza), temperatury czy też różnych związków chemicznych, przede wszystkim tych, które są obecne w wodzie zalewającej kanały ciepłownicze. Przydatna może się okazać analiza termo-grawimetryczna oraz różnicowa kalorymetria skaningowa w celu sprawdzenia stabilności termicznej spoiwa, ale także stanu materiału włókien wełny. Czynnikiem, który również należałoby sprawdzić jest wpływ wibracji na wełnę. W celu jego zbadania trzeba jednak w pierwszej kolejności zmierzyć wibracje obecne w sieci ciepłowniczej od strony rurociągów (natężenie i częstotliwość), oraz pochodzące od transportu kołowego, najlepiej w kilku reprezentatywnych miejscach. Dopiero wówczas można przejść do dalszych badań wpływu wibracji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Włoch M., Brzeziński P.: *Warszawski system ciepłowniczy a wybrane systemy europejskie*. Warszawa, 2010
- [2] Iwko I.: Zjawisko dyfuzji gazów w rurociągach preizolowanych w zależności od stosowanych środków pieniężnych i sposobu produkcji, *INSTAL*, 2012, 12, str. 6-9
- [3] Furmański P., Wiśniewski T., Banaszek J.: *Izolacje cieplne. Mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary*. Instytut Techniki Ciepłej – Politechnika Warszawska, 2006, Warszawa
- [4] Górzyski J.: *Przemysłowe izolacje cieplne*. IZOMAR, 1996, Warszawa
- [5] Chyu M.-C., Zeng X., Ye L.: Effect of underground water attack on the performance of mineral wool insulation. *ASHRAE Transactions Vol. 104*, 1998, Toronto, str. 168-175
- [6] Chyu M.-C., Zeng X., Ye L.: Performance of fibrous glass pipe insulation subjected to underground water attack. *ASHRAE Transactions Vol. 103*, 1997, Boston, str. 303-307
- [7] Pilato L., Kowatsch S.: *Phenolic Resins – A century of progress. Mineral wool insulation binders*. Springer, 2010, str. 209-242
- [8] Stazi F., Tittarelli F., Politi G., Di Perna C., Munafò P.: Assessment of the actual hygro-thermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls. *Energy and Buildings*, 2014, 68, str. 292-304
- [9] Steponaitis L., Vejeliš S., Vaitkus S.: Analysis of structure and deformation mechanisms of mineral wool slabs under compression. *Materials Science*, 2012, 18, str. 192-196
- [10] Black W.E., Betts W.S.: Vibration damage testing of thermal barrier fibrous blanket insulation. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80, str. 375-383
- [11] Siennicki M., Sikora S., Bachańska A.: Tymczasowe zasady zmniejszenia strat ciepła przesyłanego w sieciach ciepłych. *COBRTI Instal*, 1988, Warszawa
- [12] Żarnowski T.: Ageing of fibrous insulations used in district heating and power generation. *Politechnika Warszawska*, 2014, Warszawa