ELEMENTY ARCHITEKTONICZNE A FIZYKA BUDOWLI

TEKST I RYSUNKI: JERZY BOGDAN ZEMBROWSKI

Powszechnie, w naszym kraju architekt opracowując projekt budowlany, skupia się na detalach wyłącznie pod względem estetyki elewacji lub wnętrza, aby nadać obiektowi indywidualny charakter. Cel zrozumiały, ale zwykle nie uwzględnia się przy tym wpływu detali na fizykę budynku.

Z punktu widzenia architektury detalem zwykle nazywa się każdy fragment architektonicznego wykończenia budynku na elewacji lub we wnętrzu, mniej lub bardziej wyróżniający się w otoczeniu. Zupełnie inaczej należy patrzeć na to zagadnienie z punktu widzenia fizyki budowli, bo w tym zakresie detalem jest każdy element budynku wpływający na jego charakterystykę energetyczną oraz na mikroklimat wnętrza. Detale architektoniczne mogą być więc nie tylko widoczne, lecz także ukryte, np. zawiesia elewacji wentylowanych czy rury spustowe schowane w termoizolacji. Niestety, te niewidoczne dla oka elementy budynku często nie są traktowane przez architektów jako detale. Tak czy inaczej, jeśli wszystkie one towarzyszą przegrodom zewnętrznym, to wywierają wpływ na własności cieplno-wilgotnościowe budowli i muszą być analizowane w tym zakresie podczas tworzenia projektu budowlanego.

PRZYKŁAD Z ŻYCIA – ELEWACJA GMACHU OPERY

Nic nie przekonuje bardziej jak przykład z życia – proponuję wziąć pod uwagę pierwszy z brzegu budynek. Niedługo po rozpoczęciu budowy obiektu Opery i Filharmonii Podlaskiej Europejskiego Centrum Sztuki w Białymstoku zostałem poproszony przez kierownika kontraktu o pomoc w rozwiązaniu napotkanych problemów z hydroizolacjami strefy podziemnej. Przy okazji zwróciłem uwagę na nieprawidłowości w projekcie wykonawczym w zakresie detali elewacji.

Ściany potężnego i imponującego gmachu głównego o wysokości 32 m i obwodzie 150 m zaprojektowano jako monolityczne żelbetowe o grubości 25 cm, ocieplone od zewnątrz płaszczem z wełny mineralnej, pokrytym wyprawą cienkowarstwową (metodą BSO). Na ścianach przewidziano skomplikowaną sieć konstrukcji wsporczych ze stali nierdzewnej – kotwionych do żelbetu, a na nich rozciągniętą stalową siatkę ozdobną, która miała za zadanie utrzymać ciekawą fasadę w postaci intensywnie pnącej zieleni. Taka konstrukcja pokrywała 100% powierzchni ścian zewnętrznych. Na wizualizacji obiekt wyglądał imponująco i nietuzinkowo, choć podobne rozwiązanie autor zastosował już kilka lat wcześniej na gmachu Biblioteki Uniwersyteckiej w Warszawie, tyle że z miedzi i pnączy.

W projekcie konstrukcji przewidziano cztery rodzaje wsporników ze stali nierdzewnej na prostokątnych podstawach o grubości 10–14 mm i wymiarach od 150 × 250 mm do 290 × 520 mm, mocowanych do ścian żelbetowych za pomocą kotew chemicznych z trzpieniami także ze stali nierdzewnej – o średnicy 12 mm. Do wsporników przewidziano przyspawane rury kwadratowe różnych rozmiarów o grubości 4 mm, mocujące balustrady dachowe i prostokątne profile odprowadzające wodę z zielonego dachu na teren. Wszystko ze stali nierdzewnej. Wsporniki rozmieszczono w poziomie, w odstępach co ok. 130 cm, zaś w pionie co ok. 200 cm.

fot. Joanna Szubzda

Opera i Filharmonia Podlaska – Europejskie Centrum Sztuki w Białymstoku, proj. Marek Budzyński Architekt.

DETAL A FIZYKA BUDOWLI

Zaprojektowane wsporniki mają bezpośredni wpływ na charakterystykę energetyczną budynku, gdyż stanowią one punktowe mostki cieplne na ścianach zewnętrznych. Do analizy przyjmijmy wartości współczynników przewodzenia ciepła: żelbetu $\lambda = 1{,}70$ W/mK, wełny mineralnej $\lambda = 0{,}04$ W/mK, stali nierdzewnej $\lambda = 17$ W/mK oraz współczynniki przejmowania ciepła od wewnątrz $\alpha = 7{,}7$ W/m²K i od zewnątrz $\alpha = 25$ W/m²K. Trzeba przyznać, że dla doboru systemów grzejnych w projekcie poprawnie obliczono współczynniki przenikania ciepła U ścian, czyli uwzględniono istnienie punktowych mostków cieplnych w trzech na cztery strefy kotew. Nie wzięto jednak pod uwagę wpływu tych mostków cieplnych na warunki cieplno-wilgotnościowe zaprojektowanych ścian.

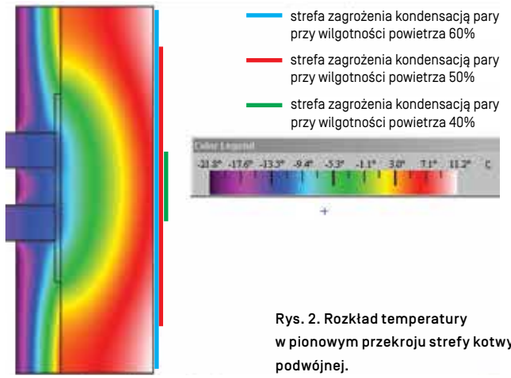
Przyjmując 20°C jako projektowaną temperaturę wewnętrzną w zimie, dla pomieszczeń takich jak foyer, widownia, sala kameralna, scena czy zaplecze sceny, oraz –22°C jako obliczeniową temperaturę na zewnątrz, dla wskazanych powyżej wartości współczynników λ oraz zaprojektowanych wymiarów jednej z kotew stalowych, zgodnie z normą[1] wykonano obliczenia przepływu ciepła w strefie mostka cieplnego metodą elementów skończonych. Pierwsza ilustracja pokazuje rozkład temperatury w przekroju tej strefy, zaś druga – rozkład gęstości strumieni przewodzonego ciepła z wnętrza na zewnątrz.

Wymagania projektowe[2] nakazują, by na wewnętrznej powierzchni zaprojektowanych i wykonanych przegród tracących ciepło nie występowało zagrożenie kondensacją pary wodnej i tworzenie pleśni. Wymóg jest spełniony, jeśli na powierzchni temperatura jest przynajmniej o 1°C wyższa niż temperatura punktu rosy dla danych warunków. Na rysunkach przedstawiono wewnętrzne powierzchnie

1 PN-EN ISO 10211-1 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni.

2 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury – w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2015 r., poz. 1422).

→ Detale lokowane na przegrodach tracących ciepło zarówno od strony elewacji, jak i od wnętrza zawsze wpływają na rozkład temperatury w warstwach przegród, a tym samym na lokalne zagrożenia kondensacją pary wodnej. ←



Rys. 2. Rozkład temperatury w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej.

ścian, na których kolorami zaznaczono strefy niespełniające tego warunku (występuje kondensacja pary wodnej):

- niebieskim – dla wilgotności powietrza wewnętrznego wynoszącego 60%;
- czerwonym – dla wilgotności powietrza wewnętrznego równego 50%;
- zielonym – dla wilgotności powietrza wewnętrznego na poziomie 40%.

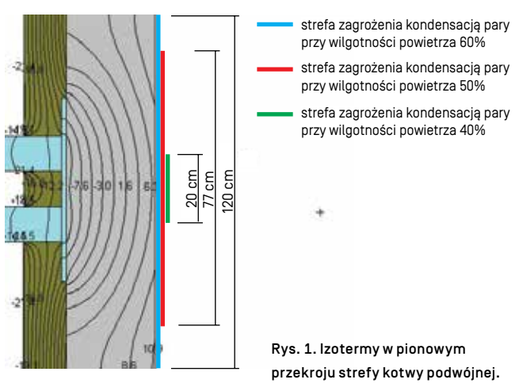
Dla powyższych wartości temperatury punktu rosy wynoszą odpowiednio: 11,9°C, 9,3°C oraz 6°C.

Z rozkładu temperatury widać, że podczas eksploatacji, w spodziewanym zakresie wilgotności względnej powietrza wewnątrz zajdzie kondensacja pary wodnej na powierzchni ścian. Taki stan jest niedopuszczalny i wymaga korekty opracowanych detali. W tym przypadku ważne, że zaprojektowany zestaw kotew zwiększa średni współczynnik przenikania ciepła U ścian o 43% w stosunku do ścian bez kotew, ale tak samo ocieplonych. Wynika to z faktu, iż strumień ciepła przenikającego przez ścianę w samej tylko strefie kotew jest ponad 6 razy większy, niż gdyby ich tam nie było.

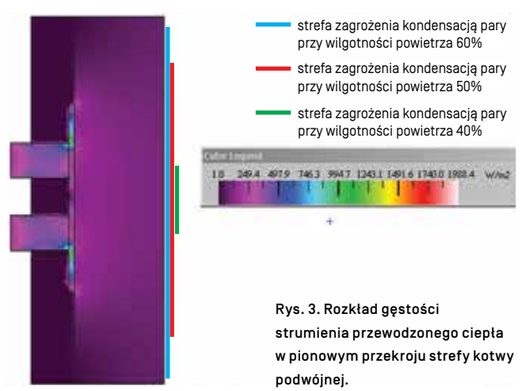
Nieuchronnie pada pytanie: jak się ustrzec przed wykazaną analizą kondensacją pary wodnej na ścianach wewnątrz gmachu? Takie też pytanie padło na naradzie technicznej, jaką zwołano u inwestora, gdy przedstawiłem wyniki analiz dla wszystkich zaprojektowanych rodzajów łączników. Podkreślono przy tym zasadniczą kwestię, że na budowę dostarczono już wszystkie kotwy i stelaże wykonane na zamówienie zgodnie z zapotrzebowaniem określonym w projekcie wykonawczym. Ich zastosowanie stało się zatem konieczne bez wprowadzania zmian. Ponieważ stal nierdzewna 10 razy lepiej przewodzi ciepło niż żelbet, to zwiększanie grubości termoizolacji ściany celem poprawy stanu cieplno-wilgotnościowego nie wyeliminuje od wewnątrz zagrożenia kondensacją pary w strefie kotew. Owszem, zmniejszy się przy tym wynikowy współczynnik przenikania ciepła U ściany, ale nie zredukuje się strumienia ciepła przewodzonego przez stalowe kotwy, czyli tą drogą nie zostanie zlikwidowana kondensacja pary wodnej na ścianach.

ROZWIĄZANIE POPRAWNE

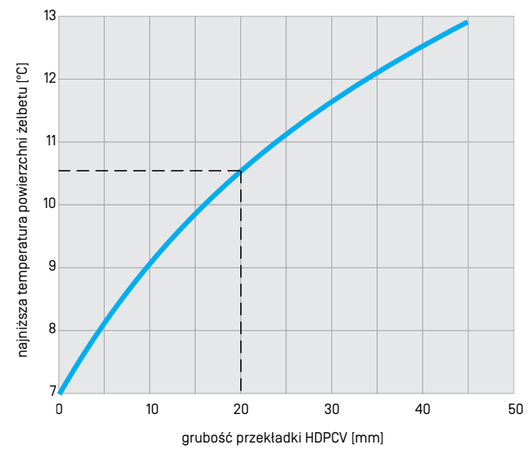
Jedynym wyjściem w tej sytuacji było zastosowanie przekładki termicznej pomiędzy płytą kotew a żelbetem. Wykonanie nowych symulacji przepływu ciepła



Rys. 1. Izotermy w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej.



Rys. 3. Rozkład gęstości strumienia przewodzonego ciepła w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej.

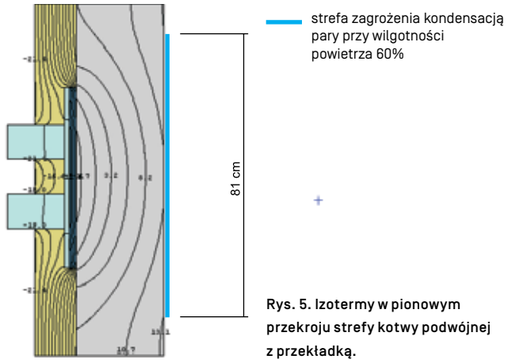


Rys. 4. Zależność najniższej temperatury powierzchni ściany od grubości przekładki HDPCV.

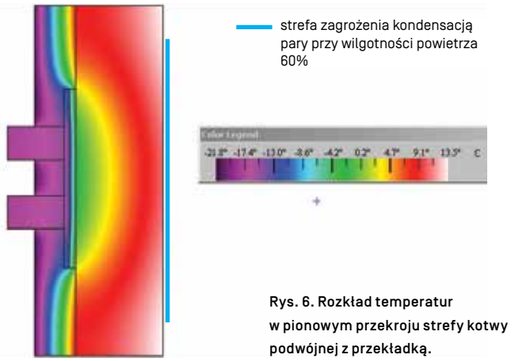
po przyjęciu różnych grubości przekładek ze spienionego HDPCV, którego współczynnik λ wynosi 0,17 W/mK (jest 10 razy mniejszy niż współczynnik przewodzenia żelbetu i 100 razy mniejszy niż stali nierdzewnej), wykazało zależność temperatury na ścianie od grubości takiej przekładki, co zostało przedstawione na ilustracji trzeciej. Okazało się, że zastosowanie przekładki grubszej niż 20 mm nie wchodzi w grę z uwagi na wymiary już dopasowanych połączeń dostarczonych elementów elewacyjnych i rur spustowych. Z konieczności więc zastosowano przekładkę 20-milimetrową, mimo iż jak wynika z tej ilustracji, dla całkowitego wyeliminowania kondensacji pary wodnej należałoby użyć przekładki o grubości 50 mm – gdyby we wnętrzach doszło do wzrostu wilgotności powietrza do 60%.

Uzyskany nowy rozkład izoterm w przekroju ściany został przedstawiony na rysunku 5, rozkład temperatury w tym przekroju na rysunku 6, zaś rozkład gęstości strumienia przewodzonego ciepła na 7. Linią niebieską oznaczono nową strefę kondensacji pary wodnej przy największej możliwej wilgotności powietrza wynoszącej 60%. Rozmiar strefy kondensacji zmalał ze 102 do 81 cm. W tym rozwiązaniu zostały całkowicie wyeliminowane czerwona i zielona strefa kondensacji. Co ważne, strumień ciepła w strefie analizowanego mostka cieplnego wywołanego przez kotwę, dzięki przekładce o grubości 20 mm, zmalał o 28%. Autor projektu budowlanego omawianego obiektu zaakceptował nowe rozwiązanie.

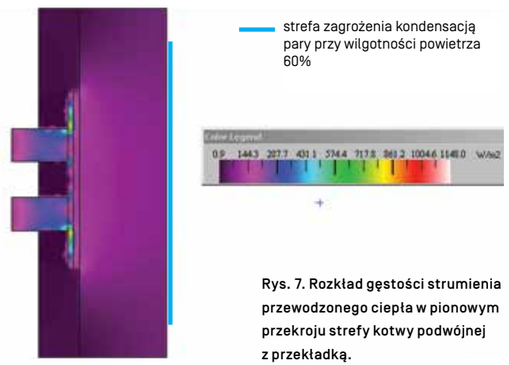
W tej sytuacji, w celu wyeliminowania kondensacji pary na ścianach, podano wytyczne dla projektanta systemu wentylacji i klimatyzacji, aby automatyką zapewnić nieprzekraczalną wilgotność powietrza wynoszącą 53%. Z zapasem 1°C odpowiada to najniższej temperaturze ściany – równej 10,5°C. Dzięki temu podczas eksploatacji nie powstanie zagrożenie kondensacją pary wodnej na ścianach we wnętrzu. Co ciekawe, autor projektu wyciągnąwszy wnioski z tych analiz, na wszelki wypadek zastosował czarny kolor ścian we wnętrzu gmachu, by nie było widać ewentualnych ciemnych plam na żelbecie, jeśli wystąpiłaby tzw. zima stulecia. Argument całkiem rzeczowy, bo w Białymstoku nie raz bywały kilkudniowe



Rys. 5. Izotermy w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej z przekładką.



Rys. 6. Rozkład temperatur w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej z przekładką.



Rys. 7. Rozkład gęstości strumienia przewodzonego ciepła w pionowym przekroju strefy kotwy podwójnej z przekładką.

mrozy sięgające nawet –33°C. Zastosowane przekładki termiczne spełniły swoją rolę, bo dotychczasowa 9-letnia już eksploatacja obiektu ani razu nie wykazała istnienia kondensacji pary na ścianach wewnątrz.

RUCHY TERMICZNE PROFILI STALOWYCH

Zwróciłem uwagę na jeszcze jedną cechę praktyczną zaprojektowanej elewacji, tj. na ruchy termiczne konstrukcji ze stali nierdzewnej. Współczynnik rozszerzalności termicznej przewidzianej w projekcie stali nierdzewnej OH18N9 wynosi $k = 16 \times 10^{-6}$ 1/K. Odległość między tzw. sztywnymi mocowaniami profili pionowych do lica ściany wynosiła 15,2 m. Zatem przy zmianie projektowej temperatury zewnętrznej z –22°C zimą do 40°C latem (od strony południowej) należy się spodziewać zmian wymiarów liniowych profili o ok. 15 mm.

Stało się jasne, że trzeba umożliwić swobodne ruchy termiczne tym profilom, mimo mocowania ich przez spawanie i skręcanie na śruby do stalowych wsporników, instalowanych z kolei kotwami do ścian żelbetowych. W przeciwnym razie naprężenia skurczowe i rozszerzalnościowe zniszczyłyby konstrukcję wspornikową elewacji podczas zmian temperatury zewnętrznej. Biorąc to pod uwagę, generalny wykonawca uzgodnił z projektantem obiektu rozwiązania detali polegające na wykonaniu pionowych złączy kompensujących ruchy termiczne konsoli na co drugim punkcie stałym pionowych konstrukcji. Rozwiązania te bez zarzutu sprawdzają się do dzisiaj.

WNIOSKI

Detale lokowane na przegrodach tracących ciepło zarówno od strony elewacji, jak i od wnętrza zawsze wpływają na rozkład temperatury w warstwach przegród, a tym samym na lokalne zagrożenia kondensacją pary wodnej. Ponieważ kondensacja pary na powierzchni oraz kumulacja wilgoci w warstwach przegrody jest zabroniona, to od projektanta obiektu wymaga się sprawdzenia pod tym względem każdego detalu. W tym celu nie wystarczą uproszczone obliczenia współczynnika temperaturowego f_{Rsi} na powierzchni przegrody według normy[3]. Należy przeprowadzać analizy cieplno-wilgotnościowe detali metodą dokładną według normy[4] dla projektowych temperatury zewnętrznej w danej lokalizacji obiektu. W Polsce mamy pięć takich stref z temperaturami od –16°C do –24°C.

W każdym obiekcie detale występują dość licznie. Dla przykładu, w projekcie budowlanym omawianej opery wykazałem ponad 150 detali wymagających analizy w zakresie fizyki budowli. W projekcie średniej wielkości domu jednorodzinnego występuje zwykle 20–30 detali, ale miałem do czynienia z obiektami mającymi ich kilkaset. Oczywiście chodzi o te elementy z punktu widzenia fizyki budowli, a nie stricte architektoniczne. Takimi detalami są np. progi drzwi wejściowych, balkonowych i tarasowych, parapety, nadproża, kasety i prowadnice rolet, ościeża stolarki, kryte rury spustowe czy tak modne ostatnio słupki okien narożnych, przebicia dachu lub stropodachu przez kominy i kanały, czerpnie powietrza, gzymsy i wieńce, mocowania balustrad oraz wiele innych.

Co ciekawe, to obowiązujące przepisy[5] zmuszają projektantów do wykonywania analiz cieplno-wilgotnościowych podczas sporządzania projektów budowlanych, tyle że żaden urząd nikogo nie ściga za ich brak. Jedynie tu i ówdzie procesy sądowe w sprawie roszczeń inwestorów o odszkodowania przypominają o zaniedbaniach w tym zakresie. Procesów jest coraz więcej, bo rośnie świadomość inwestorów o obowiązkach projektantów.

Architekt nie musi umieć sporządzać sam takich analiz, choć może. Powinien jednak mieć świadomość o konieczności ich wykonania i korzystać z pomocy specjalistów fizyki budowli. Programy komputerowe wspomagające analizy – z racji wysokiej ceny i skomplikowania w obsłudze – nie są niestety powszechne. Do kodowania danych oraz interpretacji wyników obliczeń wymagają biegłej znajomości fizyki budowli. ●

3 PN-EN ISO 13788:2002 Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej. Metody obliczania.

4 PN-EN ISO 10211-1 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni

JERZY BOGDAN ZEMBROWSKI

specjalista fizyki budowli, autor poradnika dla architektów *Sekrety tworzenia murowanych domów bez błędów*; prowadzi konsultingowy serwis budowlany www.bdb.com.pl

ARTYKUŁ SPONSOROWANY