

STANISŁAW KARCZMARCZYK\*, JANUSZ KAWECKI\*\*, KRZYSZTOF KOZIÓŁ\*  
KRZYSZTOF STYPUŁA\*\*\*

## DIAGNOSTYKA ZABYTKOWEGO KOŚCIOŁA Z UWZGLĘDNIENIEM WPLYWU DRGAŃ KOMUNIKACYJNYCH

### DIAGNOSIS OF A HISTORICAL CHURCH INCLUDING INFLUENCE OF TRANSPORT VIBRATIONS

#### Streszczenie

W pracy dyskutowany jest problem kompleksowej diagnozy zabytkowego kościoła z uszkodzeniami. Biorąc za przykład badania przeprowadzone w kościele św. Mikołaja w centrum Krakowa przedstawiono zakres badań diagnostycznych przewidzianych w celu ustalenia przyczyn wystąpienia uszkodzeń. Ponieważ poddana badaniom konstrukcja jest narażona na drgania komunikacyjne generowane przez pojazdy kołowe i przejazdy pociągów szczególną uwagę zwrócono na wpływ drgań na zabytkowy obiekt. Zaprezentowano wyniki pomiarów tych drgań i analiz dynamicznych otrzymanych przy użyciu modelu konstrukcji badanego budynku.

*Słowa kluczowe:* zabytkowy kościół, drgania komunikacyjne, pomiary, analizy dynamiczne

#### Abstract

The problem of comprehensive diagnosis of a historic church with damages is discussed in this paper. Taking as an example investigations were carried out in the Church of St. Nicholas in Krakow city centre. The range of diagnostic tests designed to determine the causes of occurring damages is presented. Because this building structure is exposed to transport vibrations generated by transport vehicles and train passages special attention was paid to the influence of vibrations on the historic building. Results of measurements of these vibrations and dynamic analysis carried out by use of a building structure model are also described.

*Keywords:* historic church, transport vibrations, measurements of vibrations, dynamic analysis

\* Dr inż. – Politechnika Krakowska

\*\* Prof. dr hab. inż. – Politechnika Krakowska

\*\*\* Dr hab. inż., prof. PK – Politechnika Krakowska

## 1. Wstęp

Wraz z rozbudową infrastruktury drogowej następuje przybliżanie źródeł drgań komunikacyjnych do istniejącej zabudowy, którą mogą być również obiekty zabytkowe. W opracowywanych diagnozach stanu technicznego takich obiektów nie można pominąć wpływu drgań generowanych podczas przejazdu pojazdów. Odpowiednie analizy diagnostyczne należy przeprowadzać z uwzględnieniem zarówno aktualnych działań na budowlę jak i sytuacji występujących w przeszłości.

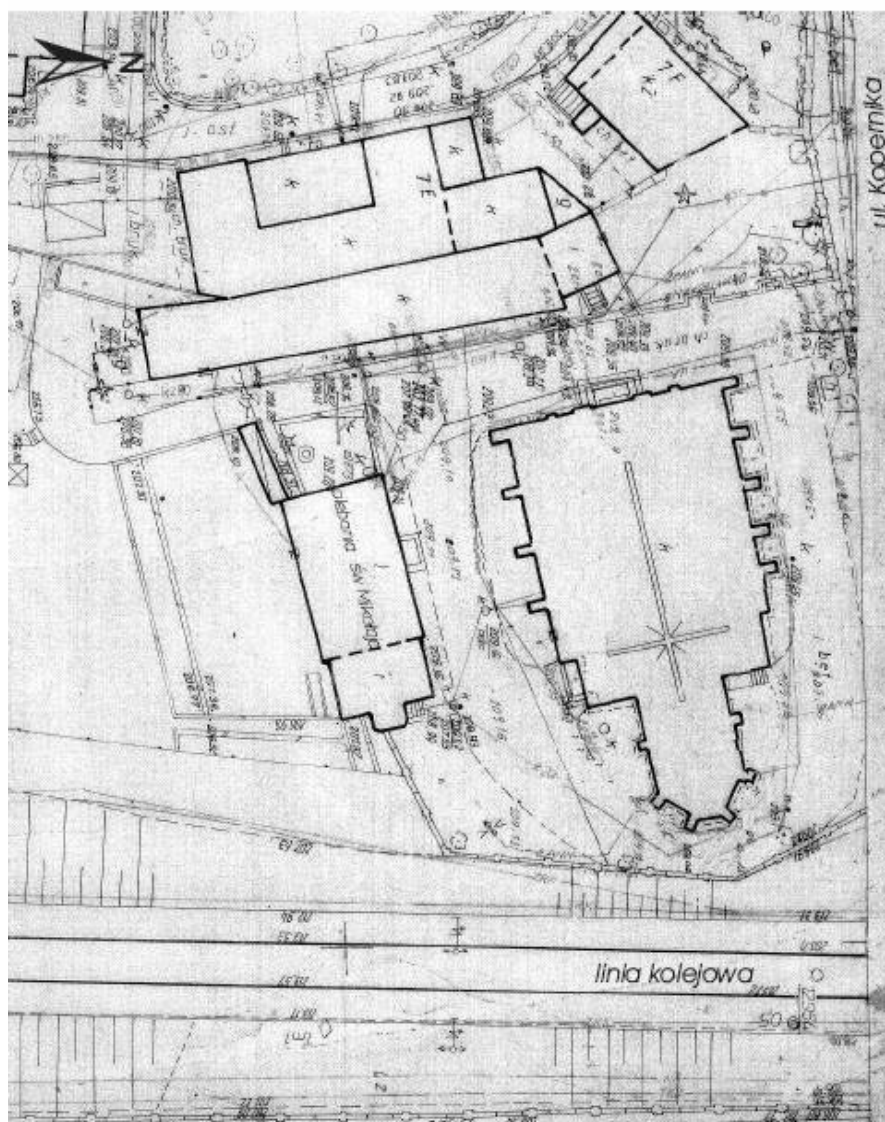
Diagnoza wykonana z udziałem autorów niniejszego referatu (por. [5]), dotycząca zabytkowego kościoła w Krakowie może być dobrym przykładem uzasadniającym powyższe stwierdzenie. Warto więc upowszechnić procedurę zastosowaną przy opracowaniu tej diagnozy.

## 2. Charakterystyka obiektu oraz cel diagnozy

Budynek kościoła pod wezwaniem św. Mikołaja jest usytuowany w centralnej części Krakowa. W pobliżu budowli, od strony wschodniej występują na nasypie dwa tory linii kolejowej, od strony północnej zaś – ulica, po której poruszają się samochody (por. rys. 1).

Kościół jest jednym z najstarszych obiektów zabytkowych Krakowa. Jest on objęty ochroną konserwatorską. Początki budowli sięgają XII w. Była ona kolejno rozbudowywana. Nie jest to budowla jednorodna. W obecnym kształcie architektonicznym kościół jest barokową i neobarokową, trójnawową i trójprzęsłową bazyliką, ale w murach świątyni przetrwały relikty romańskie i gotyckie.

Pod koniec lat 60. ubiegłego wieku nastąpił wyraźny wzrost intensywności przejazdu pociągów po torach umieszczonych w sąsiedztwie kościoła. Wykonano pomiary dynamiczne konstrukcji (por. [3]) i po szczegółowej analizie zaproponowano zastosowanie przegrody w gruncie do głęb. 3,0 m jako środka technicznego, który miał doprowadzić do redukcji drgań generowanych podczas przejazdu pociągów i przekazywanych przez podłoże na konstrukcję kościoła. Późniejsze decyzje prowadzące do zmniejszenia intensywności ruchu kolejowego i skierowanie pociągów towarowych na inną linię, z ominięciem stacji Kraków Główny spowodowało wycofanie się użytkownika linii kolejowej z wykonania przegrody wibroizolacyjnej w gruncie.



Rys. 1. Rzut obiektu z sytuowaniem źródeł drgań komunikacyjnych

Fig. 1. Location of the object and transport vibration sources

W latach 70. i 90. ubiegłego wieku wykonano kolejno: przebudowę ściany szczytowej od strony zachodniej oraz wzmocnienie i renowację dachu kościoła.

Obecnie na murach i sklepieniu kościoła występują liczne uszkodzenia w postaci rys i spękań. Przed podjęciem prac remontowych należało ustalić przyczyny tych uszkodzeń oraz opracować wnioski i zalecenia dotyczące naprawy i zabezpieczenia obiektu.

### 3. Zakres badań wykonanych na potrzeby diagnozy

Opracowanie [5] jest kompleksową ekspertyzą konstrukcyjną kościoła. W jej zakres wchodziło wykonanie:

- inwentaryzacji, analizy i oceny uszkodzeń konstrukcji;
- pomiarów w wybranych punktach pomiarowych drgań generowanych podczas przejazdu pociągów oraz samochodów;
- dynamicznej analizy komputerowej odporności konstrukcji na działanie parasejsmiczne wywołane przejazdem pociągów oraz samochodów;
- odkrywek w podłożu między murem wschodnim a podstawą nasypu kolejowego w celu sprawdzenia istnienia osłony przeciwwstrząsowej wzdłuż toru kolejowego i oceny jej stanu technicznego;
- pełnej dokumentacji geotechnicznej podłoża gruntowego pod obiektem;
- odkrywek i sprawdzenie stanu technicznego instalacji odprowadzających wody opadowe.

Na tej podstawie oraz uwzględniając informacje zawarte w [4] opracowano:

- wytyczne i zalecenia do projektu budowlano-wykonawczego wzmocnienia podłoża gruntowego pod fundamentami;
- wytyczne i zalecenia do projektu budowlanego i wykonawczego obejmującego niezbędne naprawy i wzmocnienia elementów konstrukcji zabytkowego kościoła;
- wytyczne i zalecenia odnośnie do zakresu i sposobu wykonania zabezpieczeń przeciwwstrząsowych pod torami kolejowymi związanych z planowaną przebudową i modernizacją torów.

### 4. Ogólny opis uszkodzeń na podstawie ich inwentaryzacji

Analiza przebiegu rys i pęknięć na powierzchniach ścian stanowi zwykle najbardziej miarodajne źródło informacji umożliwiających ustalenie mechanizmów i przyczyn zaistniałych uszkodzeń. Na podstawie szczegółowej inwentaryzacji zarysowań i pęknięć ścian konstrukcji kościoła stwierdzono, iż mają one charakter skrośny tzn. obejmują całą grubość ścian. W przypadku zaś sklepień identyfikacja przebiegu pęknięć w głąb konstrukcji nie była możliwa z powodu braku bezpośredniego dostępu. Wydaje się jednak, że usytuowanie niektórych pęknięć w sklepieniach (w tym pęknięć prostopadłych do osi lunet) może wskazywać na skrośny charakter rozpojeń, to zaś powoduje utratę współpracy między rozdzielonymi taką rysą płatami sklepienia.

Na ścianach poprzecznych pld. nawy bocznej występują zarysowania w sąsiedztwie zewnętrznych przypór. Charakter tych zarysowań ma bezpośredni związek z brakiem przewiązania między domurowanymi na początku XX wieku ścianami poprzecznymi i pierwotnymi, zewnętrznymi przyporami kościoła. Występujące rysy odwzorowują pierwotne półki i uskoki rozmieszczone na zewnętrznej krawędzi skarp.

Największa skala rozpojeń i pęknięć występuje w południowo-zachodnim narożniku kościoła. Analizowano więc, czy pod tą częścią konstrukcji mogło dojść do rozluźnienia

podłoża. Okazało się, że w przeszłości wykonywane tu były wykopy archeologiczne. Nie zachowała się jednak dokumentacja dotycząca tych prac. Nie można więc jednoznacznie stwierdzić jaka była głębokość wykopów oraz rozległość prowadzonych tam prac. Odkryty wówczas w tym rejonie nieznanego mur historyczny może świadczyć o dużym zróżnicowaniu warunków posadowienia. Wiadomo też, iż w rejonie opisywanego narożnika kościoła występuje podłączenie do kanalizacji rury spustowej odwodnienia dachu. Okresowe wycieki wód opadowych do podłoża mogą powodować jego rozluźnienie w następstwie wypłukiwania części pylastych. Pomimo znaczącej rozległości i rozwartości pęknięć w tym narożniku kościoła rozkład tych pęknięć na elewacji północnej nie potwierdza nierównomiernego osiadania fundamentów jako dominującej przyczyny uszkodzeń. Ewentualne osiadanie mogło jedynie pogłębić skalę uszkodzeń.

Wykonano również badania podłoża gruntowego w miejscu lokalizacji kościoła. Na tej podstawie uznano warunki geotechniczne posadowienia kościoła jako korzystne. Wykonano również przegląd i monitoring całej kanalizacji burzowej. Przegląd dotyczył wpustów rynien dachowych od krtek rewizyjnych do studzienek zbiorczych oraz kanałów pomiędzy studzienkami. Na podstawie zapisu z monitoringu ponad 31,0 mb instalacji, oraz przeprowadzonych prób przepływowych wykazano drożność analizowanej instalacji. Stwierdzono jednak, że instalacja ta jest w złym stanie technicznym i wymaga remontu, w szczególności dotyczy to wykrytych pęknięć w tej instalacji.

## 5. Badania i ocena wpływu źródeł drgań komunikacyjnych na konstrukcję kościoła

Wykonano pomiary drgań w wybranych punktach pomiarowych usytuowanych na konstrukcji kościoła. Drgania były generowane przejazdami pociągów po torach linii nr 91 Kraków-Medyka oraz przejazdami samochodów wzdłuż ul. Kopernika. Mierzono składowe przyspieszenia drgań w trzech kierunkach: dwóch poziomych x (wzdłuż podłużnej osi kościoła – prostopadłej do linii torów) i y (prostopadle do podłużnej osi kościoła tzn. równoległe do linii torów kolejowych) oraz składową pionową z. Pomiary wykonano w trzech punktach pomiarowych na konstrukcji w poziomie terenu (na fundamencie) oraz odpowiednio w trzech punktach w poziomie zwieńczenia muru.

Uzyskano maksymalne wartości przyspieszenia drgań zarejestrowanych podczas przejazdu pociągów:

- w poziomie terenu (fundamentu): składowa x – 1,25 cm/s<sup>2</sup>, składowa y – 2,12 cm/s<sup>2</sup>, składowa z – 1,34 cm/s<sup>2</sup>;
- w poziomie zwieńczenia muru: składowa x – 4,64 cm/s<sup>2</sup>, składowa y – 7,73 cm/s<sup>2</sup>, składowa z – 4,72 cm/s<sup>2</sup>.

Poziom drgań wywołanych przejazdami samochodów wzdłuż ul. Kopernika był kilkakrotnie mniejszy od wartości podanych wyżej.

Zarejestrowane przebiegi drgań posłużyły do przeprowadzenia analizy umożliwiającej ocenę wpływu drgań pochodzenia komunikacyjnego na konstrukcję kościoła. W tym celu zbudowano przestrzenny model obliczeniowy konstrukcji. Na rysunku 2 przedstawiono zastosowany podział konstrukcji na elementy. Wymiary i układ elementów przyjęto zgodnie z dostępną dokumentacją z uwzględnieniem jej weryfikacji podczas inwentaryzacji uszkodzeń. W modelu obliczeniowym uwzględniono również występujące w konstrukcji



większe uszkodzenia, przyjmując w otoczeniu tych miejsc odpowiednie zagęszczenie siatki modelu (por. rys. 3).

Kształtując model obliczeniowy przyjęto, że materiały występujące w konstrukcji charakteryzują następujące wielkości:

- mur ceglany: moduł Younga  $E = 3,2$  GPa, współczynnik Poissona  $\nu = 0,2$ , gęstość masy  $\rho = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, materiał występuje w ścianach i fundamentach;
- drewno sosnowe: moduł Younga  $E = 6,0$  GPa, moduł odkształcenia postaciowego  $G = 0,50$  GPa, gęstość masy  $\rho = 850$  kg/m<sup>3</sup>, materiał występuje w więźbie dachowej.

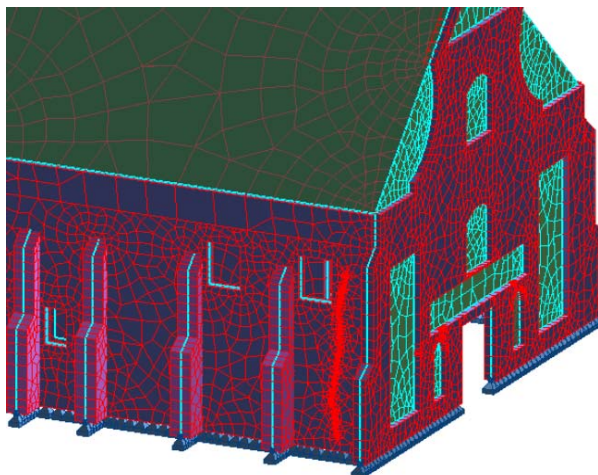


Rys. 2. Podział modelu obliczeniowego na elementy skończone

Fig. 2. Division of calculation model on finite elements

Ze zbioru przedstawionych wyżej pomiarów drgań konstrukcji kościoła wybrano jako zawierające najniekorzystniejsze wielkości, pomiary nr: 1, 19 i 22.

Wibrogramy zarejestrowane na fundamencie konstrukcji przyjęto jako wymuszenie kinematyczne modelu obliczeniowego. Przyjęto, że wymuszenie to występuje w każdym węźle na styku fundamentu z podłożem. Przyjęty model obliczeniowy można było zweryfikować porównując wartości przyspieszenia drgań uzyskane w poziomie zwieńczenia murów z zarejestrowanymi podczas tych samych pomiarów drgań. Uzyskano wystarczającą zgodność wyników.



Rys. 3. Fragment modelu z widocznym zagęszczeniem siatki MES w otoczeniu uszkodzeń

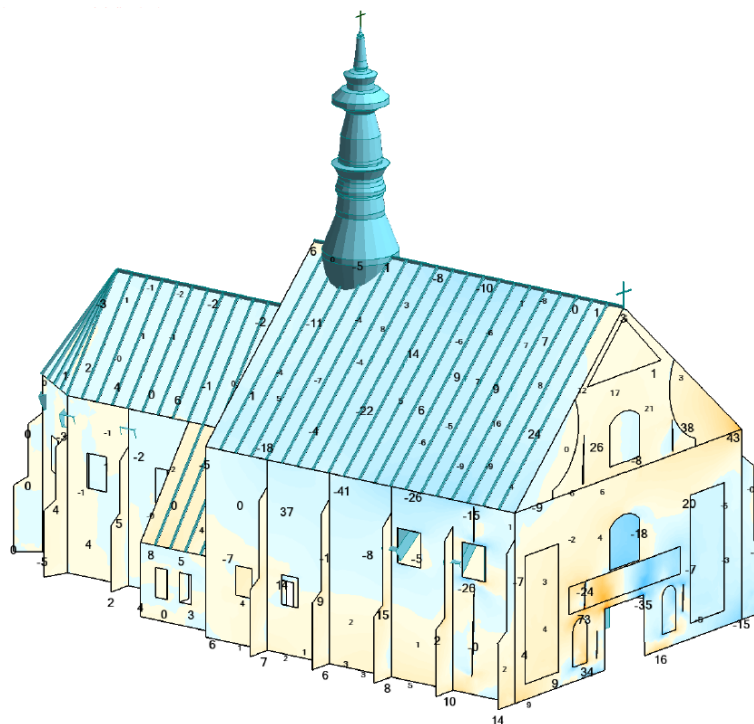
Fig. 3. Fragment of a model of FEM with the net density visible around of damages

Przedmiotem dalszej analizy było wykorzystanie modelu obliczeniowego do sprawdzenia, czy istnieje związek skutkowo-przyczynowy pomiędzy wymuszeniem generowanym przez przejeżdżający w pobliżu pociąg a rysami znajdującymi się na elementach obiektu. Analizowano więc wielkości naprężeń rozciągających występujących w przekrojach konstrukcji obiektu: w przekrojach teoretycznych nie zarysowanych oraz rzeczywistych zarysowanych. Przykładową mapę naprężeń występujących na elewacji północnej i zachodniej zamieszczono na rys. 4.

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że analizowane działanie dynamiczne wywołuje naprężenia rozciągające o następujących wartościach:

- w sklepieniach nie przekraczały one 22,0 Pa,
- w ścianach podłużnych (bocznych, prostopadłych do toru kolejowego) dochodziły do 41,0 Pa,
- w ścianach prezbiterium i w ścianie frontowej nie przekraczały 43,0 Pa z wyjątkiem obramowania otworu okiennego w ścianie frontowej, gdzie osiągały wartość 73,0 Pa.

Uzyskane z obliczeń wartości naprężeń nie świadczą o tym, aby drgania wywołane obecnie występującymi przejazdami pociągów mogły być pierwotną przyczyną powstawania uszkodzeń elementów konstrukcyjnych kościoła. Mogą one jednak doprowadzać do ujawniania się i rozwijania uszkodzeń spowodowanych wcześniej innymi przyczynami.



Rys. 4. Przykładowa mapa maksymalnych naprężeń x-x (wartości w Pa, należy traktować jako znakozmienne) wywołanych drganiami generowanymi przejazdem pociągu

Fig. 4. Exemplary map of maximum stresses x-x (values in Pa, should be treated as minus or plus)- caused by vibrations generated by train passage

## 6. Wnioski

Stosunkowo obszerne badania i analizy umożliwiły rozpoznanie stanu konstrukcji oraz nakreślenie kierunku działań technicznych mających doprowadzić do jej naprawy i wzmocnienia. Do grupy głównych zaleceń zaliczono:

- wykluczenie konieczności wykonywania wzmocnienia podłoża pod fundamentami,
- uznano – w obecnej sytuacji ruchowo-drogowej – za najwłaściwsze rozwiązanie prowadzące do redukcji drgań przekazywanych na konstrukcję zastosowanie wibroizolacji w konstrukcji torów linii kolejowej przebiegającej w sąsiedztwie kościoła (na odcinku około 150 m tzn. po 75,0 m na północ i południe od prezbiterium kościoła),
- zalecono wykonanie w trybie pilnym naprawy i remontu instalacji odprowadzającej wody opadowe,
- wskazano na konieczność naprawy uszkodzeń murów i ścian i podano zakres prac zabezpieczających.



Wobec braku niezbędnych danych dotyczących procesu narastania uszkodzeń zalecono także założenie reperów w wytypowanych miejscach na konstrukcji i prowadzenie obserwacji geodezyjnej pionowych przemieszczeń przynajmniej dwa razy w roku (w okresach: wrzesień–listopad oraz marzec–kwiecień).

#### L i t e r a t u r a

- [1] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., *Ocena wpływów dynamicznych na budynki i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna)*, Wyd. ITB, Warszawa 1993.
- [2] Ciesielski R., Kawecki J., Pieronek M., Zięba A., *Opinia w sprawie osłony przeciwwstrząsowej kościoła św. Mikołaja w Krakowie położonego w pobliżu linii kolejowej Kraków-Medyka*; Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli, sierpień 1972.
- [3] Kozioł K., Stypuła K., *Obliczenia symulacyjne w projektowaniu wibroizolacji nawierzchni szynowych. Wybrane przykł. zastosowań*, DROGI Lądowe - Powietrzne - Wodne, Nr 10/2010 (29), s. 95-109.
- [4] PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [5] Rojkowska H., Niewałda W., *Dokumentacja z badań historyczno-archit. dla kościoła św. Mikołaja przy ul. Kopernika 9 w Krakowie*, Kraków 1995–1997.
- [6] Stypuła K. (kier. zespołu autorskiego), *Specjalistyczna ekspertyza konstrukcyjna z wykonaniem pomiarów drgań i dynamicznej analizy komputerowej oraz badań geotechnicznych podłoża gruntowego kościoła św. Mikołaja przy ul. Kopernika 9 w Krakowie*, Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli, listopad 2009.