

# Wpływ oblodzenia na aerodynamikę cięgien mostów podwieszonych

## Streszczenie

W rozprawie przedstawiono metodologię i wyniki badań eksperymentalnych dotyczące wpływu oblodzenia na aerodynamikę cięgien mostów podwieszonych. Prace badawcze wykonano w tunelu aerodynamicznym z komorą klimatyczną Laboratorium Czeskiej Akademii Nauk w Telč, Czechy.

W pierwszej części rozprawy przedstawiono wprowadzenie wraz z opisem problematyki badawczej, sformułowano cel i zakres rozprawy, a także wymieniono zaplanowane zadania badawcze, których wyniki stanowią oryginalne elementy rozprawy. Następnie przedstawiono ujęcie teoretyczne wybranych aspektów modelowania pola prędkości wiatru, omówiono specyfikę obciążenia wiatrem cięgien mostów podwieszonych i podstawy teoretyczne zjawiska niestabilności aerodynamicznej typu galopowania. Podano klasyfikację oblodzenia atmosferycznego i omówiono zagrożenia dotyczące fizyki szybkości przyrostu oblodzenia przekrojów cylindrycznych. W dalszej części dokonano przeglądu literatury światowej w tematyce rozprawy i podkreślono niedostatek dotychczasowych badań doświadczalnych związanych z aerodynamiką oblodzonych cięgien mostowych. W kolejnej części rozprawy wyjaśniono budowę i parametry techniczne tunelu aerodynamicznego, w którym zrealizowano badania eksperymentalne.

W drugiej części rozprawy przedstawiono rezultaty procesów doświadczalnego oblodzenia modelu sekcyjnego osłony cięgna mostu podwieszono nachylonego pod kątem  $30^\circ$  do płaszczyzny poziomej zrealizowanych w komorze klimatycznej Laboratorium. Symulowano przy tym różne warunki klimatyczne w zakresie temperatury i wilgotności powietrza, kierunku i prędkości wiatru, a także czasu trwania procesu oblodzenia. W efekcie otrzymano sześć różnych kształtów oblodzenia cięgna, które zarejestrowano metodą fotogrametrii cyfrowej. Na tej podstawie wykonano przestrzenne modele MES odwzorowujące kształty powierzchni rzeczywistego oblodzenia. Badania aerodynamiczne wykonano dla nieruchomego, zamocowanego w pozycji poziomej, modelu oblodzonego cięgna, który wykonano metodą druku 3D. W ramach badań zrealizowano: (1) optyczną wizualizację PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*) płaskiego opływu powietrza wokół modelu oblodzonego cięgna, (2) badania liczby *Strouhala*, którą wyznaczono na podstawie analizy widmowej prędkości przepływu zmierzonej w śladzie aerodynamicznym za modelem i (3) badania modelowe trzech współczynników aerodynamicznych. Pomiary wykonano przy średnich prędkościach wiatru z przedziału  $3 \div 25$  m/s, którym odpowiadają wartości liczby *Reynoldsa* z przedziału około  $2 \cdot 10^4 \div 17 \cdot 10^4$ , przy małej i umiarkowanej turbulencji powietrza i różnych kierunkach napływu powietrza na model. Stosując metodę niezależności *IP* (ang. *Independence Principle*) oszacowano współczynniki aerodynamiczne dla cięgna z uwzględnieniem efektu jego pochylenia. Na podstawie porównania rezultatów badań aerodynamicznych dla modelu oblodzonego z rezultatami otrzymanymi dla gładkiego cylindra wykazano istotny wpływ oblodzenia cięgien na ich aerodynamikę. Dokonano oceny możliwości wystąpienia zjawiska galopowania oblodzonego cięgna na podstawie kryterium *Glauerta-Den Hartoga* przy małej i umiarkowanej turbulencji powietrza. Rozprawę zakończono ogólnym podsumowaniem.

# Influence of icing on cables aerodynamics of cable-supported bridges

## Summary

The paper is concerned with the methodology and results of experimental investigations on the effect of icing on the cables aerodynamics of cable-supported bridges. The experimental investigations were carried out in the Climatic Wind Tunnel Laboratory of the Czech Academy of Sciences in Telč, Czech Republic.

The first part of the paper presents the introduction containing the description of research issues, the purpose and scope of the dissertation, as well as planned research tasks whose results constitute the original elements of the dissertation. Then, the theoretical approach of some aspects of wind velocity field modeling is presented, the wind loads acting on the bridge cables and theoretical basis of the phenomenon of galloping instability are discussed. The atmospheric icing classification is given and the physics of the rate of increase in icing of cylindrical elements is described. In the next part, the literature concerning the examined problems was reviewed and the lack of previous experimental investigations related to the aerodynamics of iced bridge cables is pointed out. The next part of the paper explains the construction and technical parameters of the wind tunnel, in which experimental investigations were carried out.

In the second part of this paper the results of experimental procedures leading to the icing of the circular sectional cable model inclined at an angle of  $30^\circ$  to the horizontal plane were described. During the icing processes in a climatic section of the laboratory various climatic conditions regarding air temperature and humidity, wind velocity and direction as well as the duration of icing process were simulated. As a result, six different ice shapes of the cable model were obtained, which were registered using a photogrammetry method. Then, a three-dimensional numerical models FEM were created to reproduce the obtained shapes of the ice surface. The aerodynamic investigations were performed for the iced model fixed horizontally and motionless, perpendicular to the air flow, which was made by 3D printing method. Within the framework of the aerodynamic tests the following tasks were conducted: (1) the optical visualization PIV (*Particle Image Velocimetry*) of two-dimensional airflow around the iced cable model and its wake, (2) the *Strouhal* number investigations, which was determined on the basis of the spectral analysis of the flow velocity measured in the wake behind the iced cable model, and (3) model investigations of three aerodynamic coefficients. All tests were carried out at free stream velocities within the range of  $3 \div 25$  m/s, which correspond to the *Reynolds* number values within the range of  $2 \cdot 10^4 \div 17 \cdot 10^4$ , in both the low and moderately turbulent flow conditions, in relation to the various flow direction. Using the so-called Independence Principle method (*IP*), the aerodynamic coefficients of the iced model were estimated taking into account the effect of the cable inclination. Based on a comparison of the results of aerodynamic tests obtained for the iced model with the results obtained for a smooth cylinder, a significant effect of icing on cables aerodynamics was demonstrated. The assessment of the possibility of galloping instability of the iced bridge cable based on the *Glauert-Den Hartoga* criterion at low and moderate turbulence was made. The dissertation was concluded with a general summary.