



PRELIMINARY INTERFEROMETRY MEASUREMENTS OF FLOW FIELD AROUND A FLUTTERING NACA0015 PROFILE

Václav Vlček, Jan Kozánek *

Summary: The paper presents experimental results of the optical measurements of flow field around a fluttering NACA0015 profile elastically supported with two degrees of freedom in subsonic wind flow. The high-speed camera was used for the interferometry visualization of the airflow in different phases of the profile motion. Special care was devoted to the plotting of the fringes near the surface of the profile, which was blurry due to the fast vibration. Examples of the interferograms, pressure and velocity development around the surface of the vibrating body and the phase shift between rotation and translation cycles are presented.

1. Úvod

Pro aeroelastické experimenty byl použit profil elasticky upevněný se dvěma stupni volnosti v měřicím prostoru aerodynamického tunelu. Základ profilu tvoří dutá kostra vyrobená ze skelných laminátů, která byla pro zvýšení hmotnosti potažena olověným plechem. Vnitřek profilu byl vyplněn pryskyřicí s příměsí olova. Tento profil byl upevněn do lehkého hliníkového rámu. Rotační stupeň volnosti byl dosažen tak, že profil byl na jednom boku v rámu volně otočný, na druhé straně byl točivý pohyb omezen torzní tyčkou, která byla pevně upevněna jak uvnitř modelu, tak na posuvném rámu. Druhý stupeň volnosti umožňoval posuvný pohyb ve svislém směru, kdy elastický člen tvořila dvě plochá pera opírající se nahore a dole o posuvný rám s rotačně uchyceným profilem. Při rychlostech blízkých $M = 0,4$ docházelo po zavedení počáteční poruchy (vychýlení soustavy ve svislém směru) ke vzniku samobuzeného kmitání. Tětiva profilu byla 65,5 mm, (viz Vlček V. et al 2009).

Popsané zařízení bylo umístěno do měřicího prostoru podtlakového aerodynamického tunelu o průřezu 80 x 210 mm. Ke zviditelnění proudu byl použit Machův-Zehnderův interferometr ÚT AV ČR, v.v.i. Pro potřeby kontroly výrobních odchylek profilu a pro výpočet náhradního profilu při vyhodnocování interferogramů byla použita rovnice NACA 00xx profilů (viz Wikipedia):

$$y = 5 \cdot t \cdot c \left[0.2969 \cdot \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \cdot \frac{x}{c} - 0.3516 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right], \quad (1)$$

kde c je délka tětivy,

x je průběžná poloha bodu na profilu podél tětivy od 0 do c ,

t je poměr největší tloušťky profilu k délce tětivy,

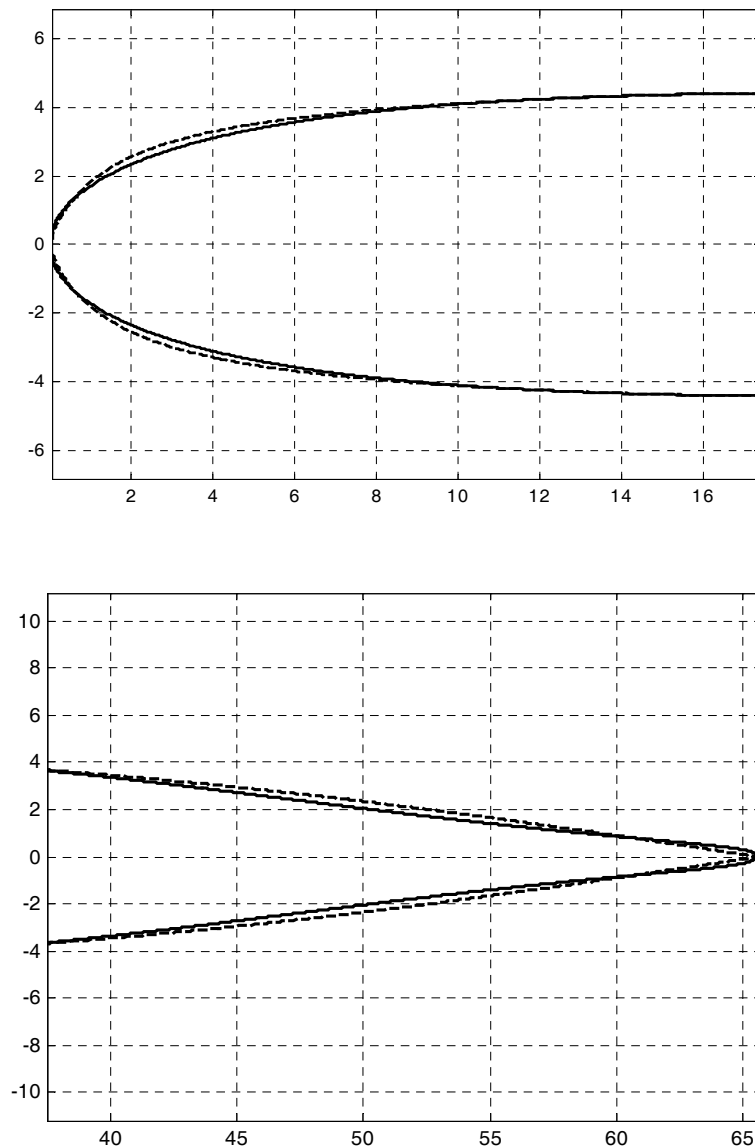
y je poloviční tloušťka profilu pro danou hodnotu x .

* Ing. Václav Vlček, CSc., Ing. Jan Kozánek, CSc., Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Dolejškova 5, 182 00, Praha 8, Czech Republic

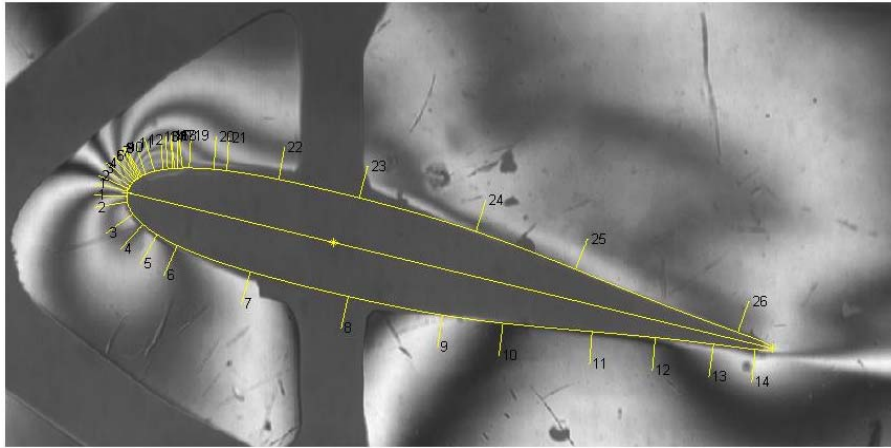
Hodnota 100t určuje číselnou hodnotu posledních dvou číslic v označení profilu.

Rovnice byla nahrazena polynommem stupně 11 a poté byl takto určený profil použit jednak k určování odchylek vyráběného modelu od jeho ideálního tvaru (viz obr.1), jednak při vyhodnocování interferogramů k náhradě obrysu skutečného profilu.(viz obr.2 a 3), kde jsou též křivě vyznačeny polohy proužků na povrchu profilu očíslovanými vztázkami.

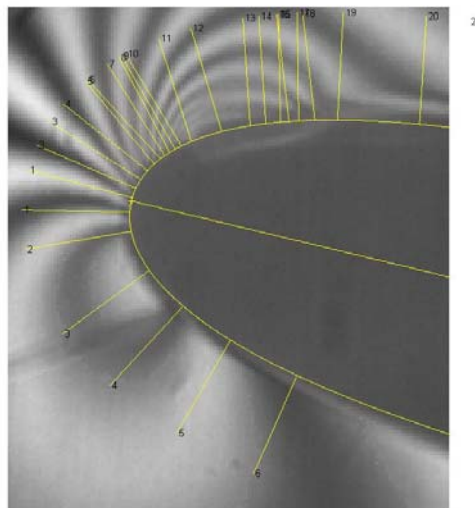
Na obr.1 je červeně zakreslen tvar podle rovnice (1), zelenou barvu má tvar zjištěný orýsováním skutečného profilu; oba mají společné body na obou koncích tělivy a v místech největší tloušťky profilu. Jak je vidět z obr.1, jisté odchylky mezi oběma profily: jsou ve vzdálenosti asi (0,05-0,1).t a (0,6-0,8).t od náběžné hrany. Další odchylka od ideálního tvaru je v okolí odtokové hrany, neboť reálný profil má půlkruhovou odtokovou hranu o tloušťce asi 1 mm.



Obr.1. Porovnání vyrobeného profilu s jeho analytickým tvarem.
(Plná čára odpovídá vyrobenému profilu, čárkovaná čára odpovídá profilu NACA0015)



Obr.2. Náhrada obrysu profilu na interferogramu jeho analytickým tvarem.

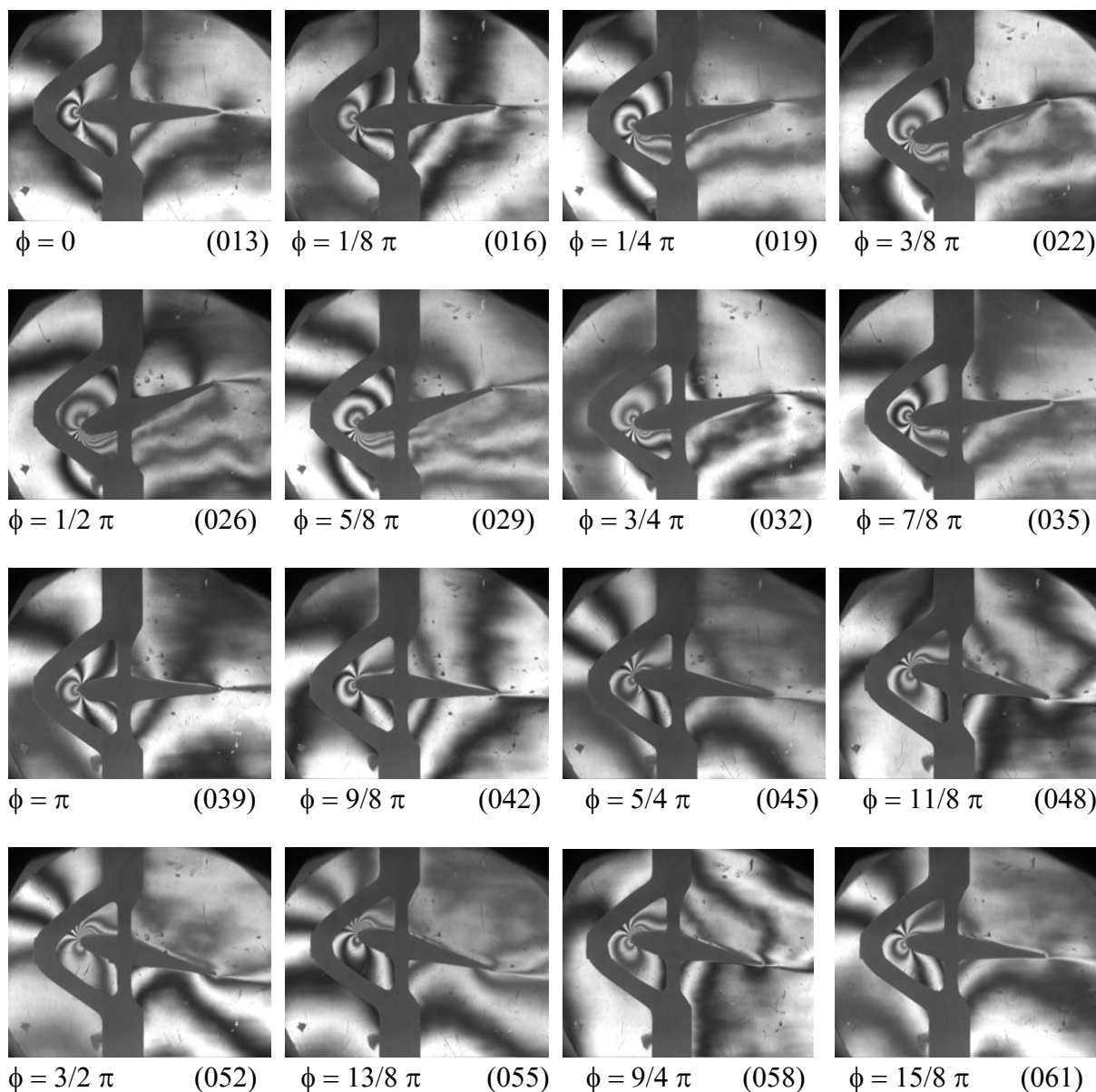


Obr.3. Detail interferogramu v okolí náběžné hrany profilu.

2. Výsledky experimentů

Měření byla uskutečněna při rychlosti nabíhajícího proudu $M = 0,43$, Reynoldsovo číslo vztahované na tětivu profilu bylo $Re = 0,52 \cdot 10^6$. Obraz proudového pole byl snímán rychlostní kamerou NanoSense MkIII s frekvencí obrázků 1000 Hz. Frekvence kmitání vyhodnocená z optických měření byla stejná u posuvu i rotace 19.5 Hz (51,3 obr./periodu = 51,3 ms).

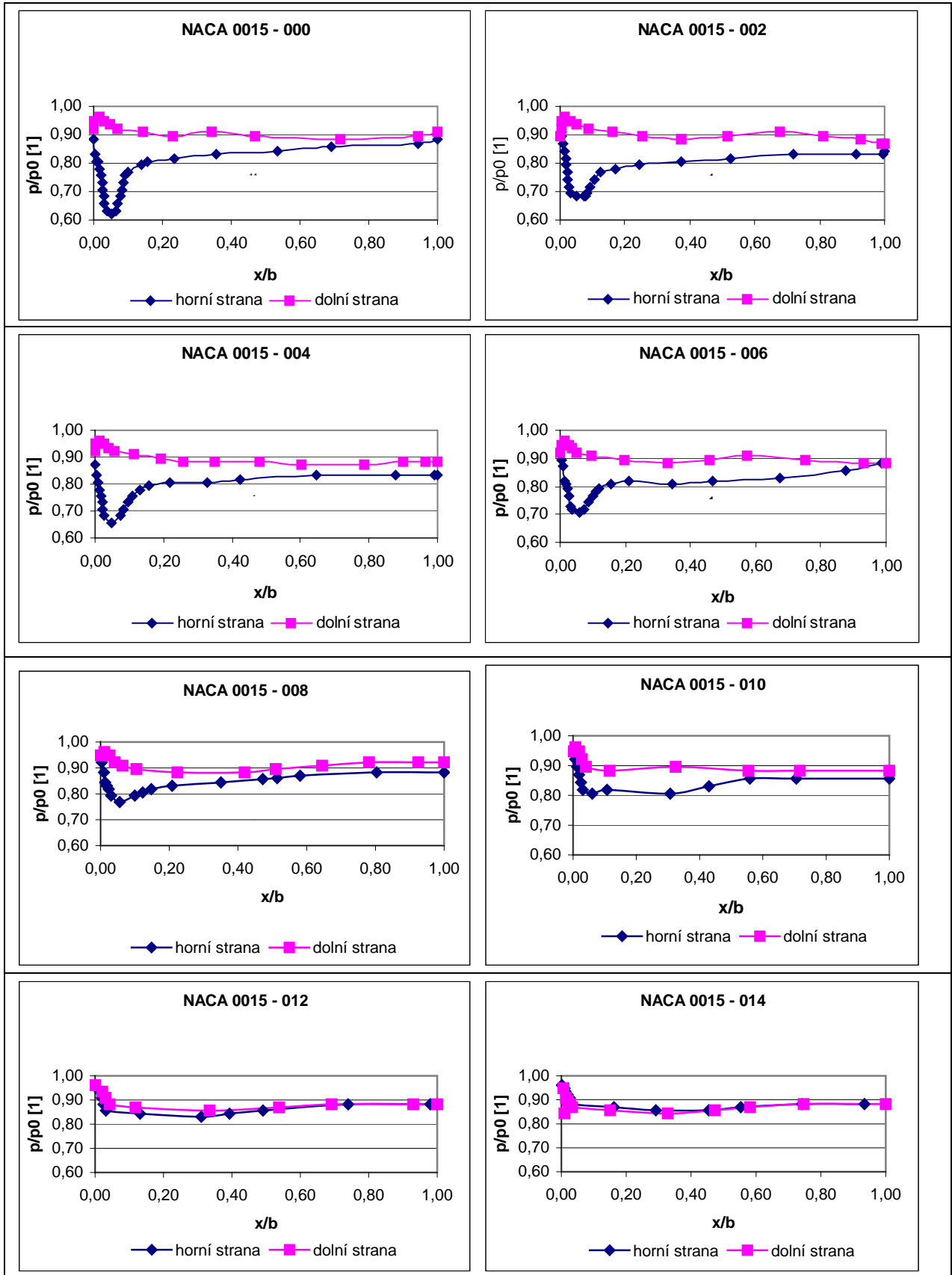
Výběr z interferogramů pro jednu periodu je na obr.4.



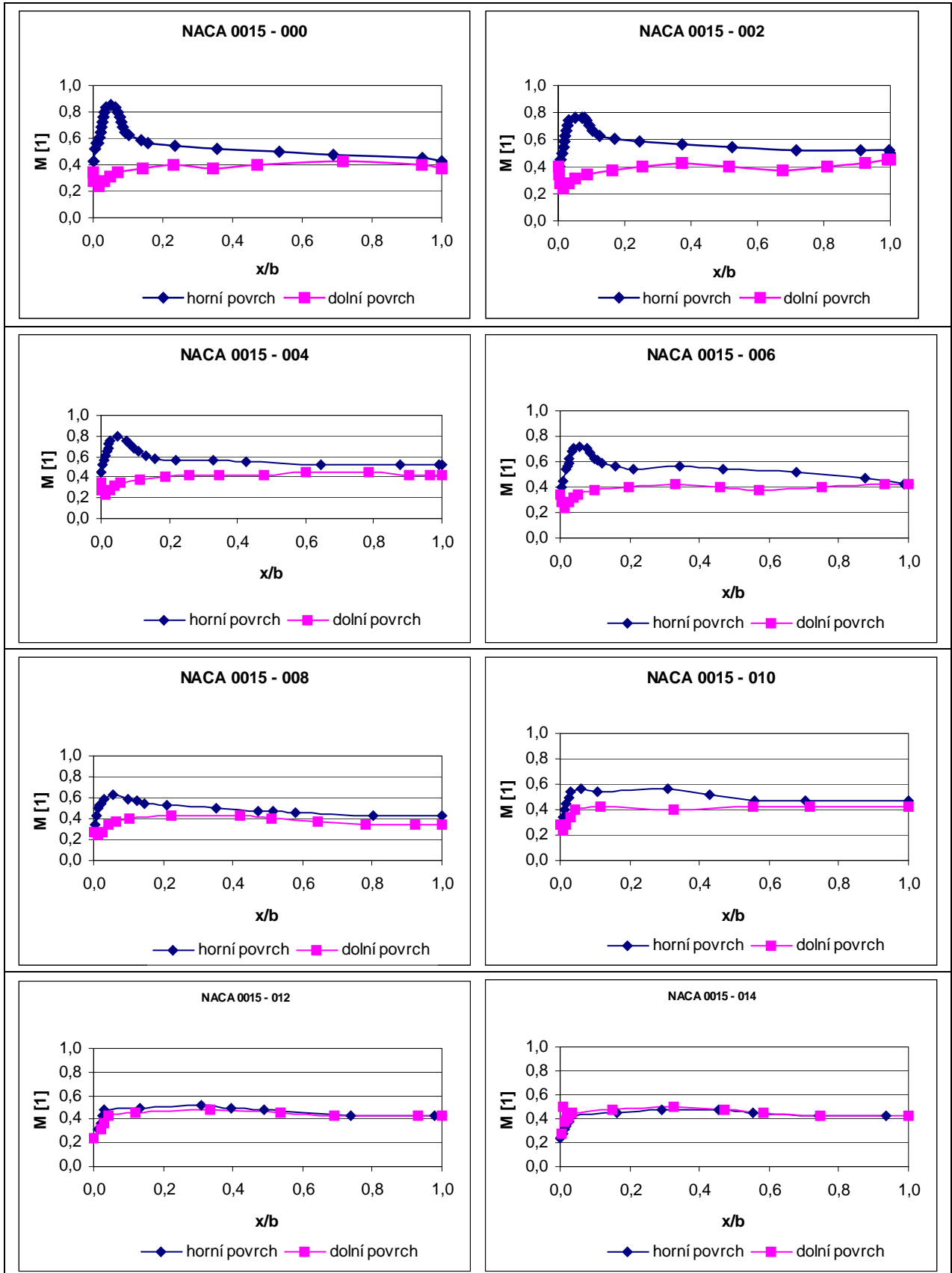
Obr.4. Interferogramy jedné periody flutteru

V důsledku malé velikosti kmitajícího profilu je obrys profilu na interferogramech rozostřený a odečítání polohy proužků v oblastech s velkým gradientem rychlosti by bylo nepřesné. Proto byl pro vyhodnocování interferogramů sestaven program v Matlabu, který umožňuje ve zvětšení vložit do vyhodnocovaného obrázku obrys profilu NACA0015 vypočtený podle upraveného vztahu (1). a na tomto náhradním profilu pak odečítat průsečíky interferenčních proužků s povrchem obtékaného profilu. Program umožňuje znázorňovat rozložení tlaků a rychlostí podél povrchu profilu, místo dosud běžnějšího rozložení podél tělvy profilu. Příklad náběžné hrany upravené pro vyhodnocování tímto postupem je na obr.2. Interferogramy byly vyhodnocovány za předpokladu isentropického proudění.

Výsledky měření tlaku p (p_0 značí celkový tlak) po povrchu profilu během jedné čtvrtperiody $\phi = 3/2 \pi$ až $\phi = 0$ jsou uvedeny na obr.5. Na obr. 6 jsou znázorněny odpovídající průběhy Machova čísla podél povrchu



Obr.5. Rozložení tlaku po povrchu profilu



Obr.6 Rozložení Machova čísla po povrchu profilu

3. Závěry

Během experimentů bylo opticky proměřeno proudové pole v okolí profilu kmitajícího se dvěma stupni volnosti. Kmitání vůči ose tunelu bylo mírně nesymetrické v posuvné i rotační složce. U vyhodnocených případů byl rozkmit posuvné složky přibližně $\pm 7\text{mm}$ a rozkmit úhlové složky asi $\pm 17^\circ$. Oproti předchozím měřením na dvoukruhovém 18% profilu, kde průběhy posuvů a natočení byly ve fázi (Vlček V. et al., 2008), v tomto případě byl podle předběžných odhadů průchod klidovou polohou u posuvu opožděn oproti průchodu klidovou polohou natočení asi o $7-8^\circ$, což odpovídá asi sedmi snímkům rychlostní kamery.

Na žádném snímku nebylo zjištěno odtržení před odtokovou hranou.

Pro potřeby vyhodnocování interferogramů byl sestaven program v Matlabu, který umožňuje vkládat do jednotlivých snímků obrysy skutečného profilu a odečítat souřadnice průsečíků jednotlivých interferenčních proužků s tímto náhradním profilem. Program umožňuje také znázorňovat průběhy tlaků a rychlostí podél povrchu profilu, místo běžně užívaného rozložení podél tětiny profilu.

Režim proudění byl blízko ucpání tunelu, jak bylo zjištěno z průběhu tlaků při dalším otevírání regulačního orgánu tunelu. Zvuková čára určující kritický průřez není na obrázcích vidět, probíhala zřejmě v oblasti regulačního orgánu za profilem.

Poděkování

Autoři děkují Grantové agentuře ČR za finanční podporu prostřednictvím projektu 101/09/1522 a prof. Ing. Pavlu Šafaříkovi CSc. za konzultace při vyhodnocování interferogramů

Literatura

Vlček, V., Horáček, J., Luxa, M., Veselý, J., Bula, V. (2009) Visualization of unsteady flow around a vibrating profile: experimental set-up and preliminary tests. *Interaction and Feedbacks Proceedings, 2009*, ed. Zolotarev I., Praha, IT AS CR, v.v.i., pp. 75-83, ISBN 978-80-87012-23-9.

Vlček, V., Horáček, J., Luxa, M., Veselý, J. (2008) Visualization of unsteady flow around a vibrating profile. *Flow Induced Vibrations Proceedings of the 9th International Conference on Flow-Induced Vibration, FIV2008*, eds. Zolotarev I., Horáček J., Praha, IT AS CR, v.v.i., pp. 531-536, ISBN 80-87012-12-7.

http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil