



VYUŽITÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU DYNAMAG PRO MONITOROVÁNÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ VE VISUTÉ LÁVCE

USE OF THE DYNAMAG MEASUREMENT SYSTEM DYNAMAG FOR MONITORING THE MECHANICAL STRESS IN THE PEDESTRIAN BRIDGE

Pavel Obluk¹, Jiří Tkáč²

Abstrakt

Cílem této studie je prezentovat na konkrétním příkladu možnosti využití měření magnetoelastických vlastností feromagnetických materiálů v rámci monitoringu stavebních konstrukcí. Vzhledem k tomu, že tyto vlastnosti u řady konstrukčních materiálů závisí na mechanickém napětí daného prvku, lze je použít pro měření vneseného mechanického napětí v tahu, tlaku či torzi. Příspěvek popisuje implementaci takového měřicího systému na unikátní visuté lávce Sky Bridge v turistickém resortu Dolní Morava, která je nejdelším mostem pro pěší na celém světě. Je zavěšena na dvou nosných stožárech přikotvených k podloží lanovými zemními kotvami. Tyto zemní kotvy byly již v průběhu výstavby opatřeny magnetoelastickými snímači, které umožnily jak sledování napínacího procesu, tak následný monitoring po ukončení výstavby.

Abstract

The aim of this study is to present, on a particular example, the possibilities of using measurement of magnetoelastic characteristics of ferromagnetic materials for monitoring building structures. Since these characteristics depend on mechanical stress for many structural materials, it is possible to use them to measure applied mechanical stress caused by tension, compression or torsion. This article describes the implementation of such measurement system on the unique pedestrian bridge Sky Bridge in the Dolní Morava tourist centre, which is the longest pedestrian bridge in the world. It is suspended on two masts anchored to the ground with ground anchors. These anchors were equipped with magnetoelastic sensors during the construction work, which allowed the force to be monitored not only during tensioning but also after the construction was completed.

Klíčová slova

Magnetoelastický dynamometr, hysterezní smyčka, zemní kotvy

Key words

Magnetoelastic dynamometr, hysteresis loop, ground anchors

1. Úvod

Visutá lávka Sky Bridge v resortu Dolní Morava má celkovou délku 721 m. V nejvyšším bodě nad údolím se nachází ve výšce 95 m nad zemí. Konstrukce zahrnuje 6 hlavních nosných lan napnutých na 3600 kN a 60 větrných lan (Obr. 1). Je volně zavěšena na dvou nosných krátkých pylonech, které jsou k podloží přikotveny pomocí dvanáctilánových zemních kotev. V průběhu výstavby v roce 2021 bylo 6 vybraných zemních kotev na každé straně lávky opatřeno magnetoelastickými snímači s vnitřním průměrem 100 mm, které byly kalirovány v průběhu napínacího procesu pomocí certifikovaného hydraulického napínacího zařízení (Obr. 2). Zároveň umožnily sledování vlastního napínacího procesu a stanovení výsledné síly po zakotvení a odpojení hydraulického zařízení. Magnetoelastické snímače byly použity pro další měření mechanického napětí v zemních kotvách na základě požadavku investora stavby. Umožňují dlouhodobý monitoring jak stacionárních, tak dynamických sil. Spolu s dalšími monitorovanými parametry se tak stávají prvky komplexního monitorovacího systému Health Monitoring System a přispívají ke zvýšení životnosti konstrukce. Stejný měřicí systém byl aplikován také u dalších obdobných konstrukcí, např. na zavěšeném mostu přes Dunaj v Linci, který převádí dopravu z tunelů na mezinárodní silnici A-26, nebo železniční ocelový a betonový obloukový most Chenab Rail Bridge v Indii, překlenující horské údolí v Himalájích, který je nejvyšším železničním mostem na světě.

2. Měřicí technologie

Magnetoleastický měřicí systém je založen na využití magnetoelastického principu, tedy změny magnetoelastických vlastností některých feromagnetických materiálů odpovídající jejich aktuálnímu napjatostnímu stavu (Fabo a kol., 2010). Dostatečná citlivost těchto materiálů na vnesené napětí musí být pro nové materiály ověřena laboratorním měřením, pro většinu standardně používaných materiálů, zejména pro běžná kotevní lana 15,2 – 15,7 mm je zajištěna (Obr. 3). Snímače mají tvar válců, které jsou nasunuty na měřený prvek, v tomto případě na kotevní svazek tvořený dvanácti lany (Obr. 4 a Obr. 5). Jsou opatřeny primárním budícím vinutím pro impulsní magnetizaci měřeného materiálu a sekundárním snímacím vinutím pro detekci vzniklého indukovaného napětí. S využitím Faradayova indukčního zákona

$$VIND(t) = - d\Phi/dt$$

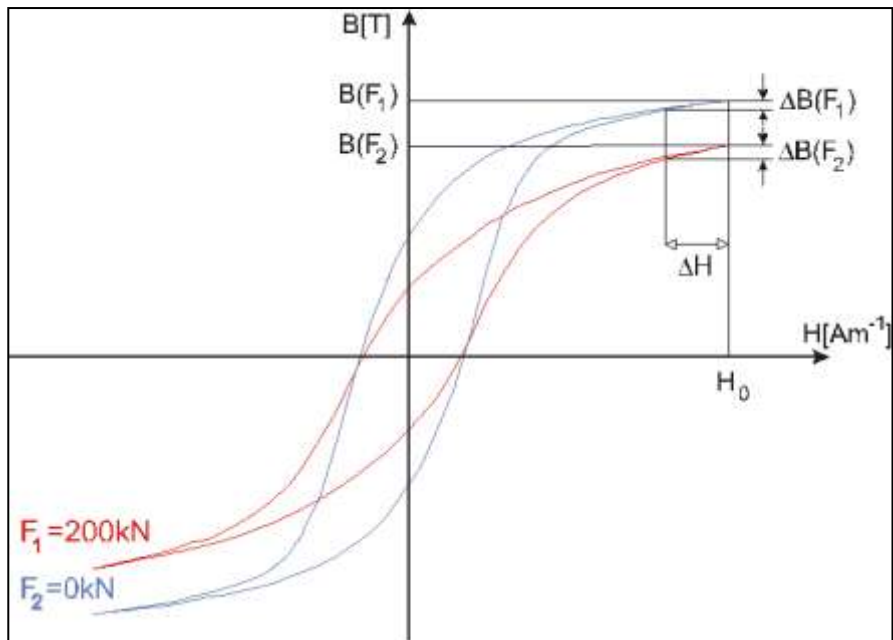
je pomocí analogového integrátoru vypočten magnetický tok. Snímač je připojen k měřicí jednotce, ať již stacionární, nebo mobilní jako v tomto případě, která dodává do primárního vinutí potřebný proud a snímá surové naměřené hodnoty magnetického toku v převodníku, které následně přepočítává na číselné hodnoty v mWb.



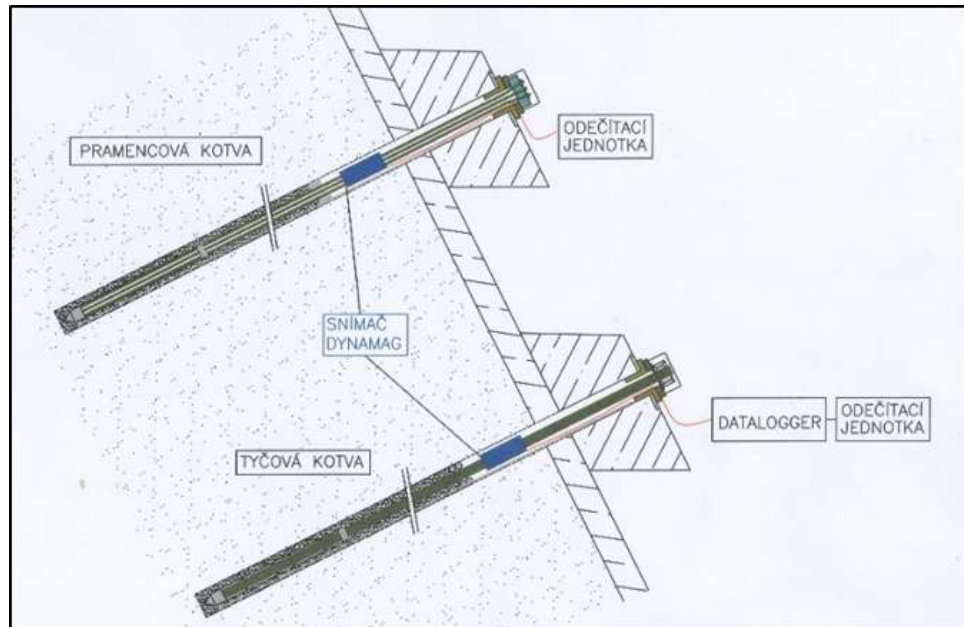
Obr. 1 Monitorovaný objekt: Sky Bridge



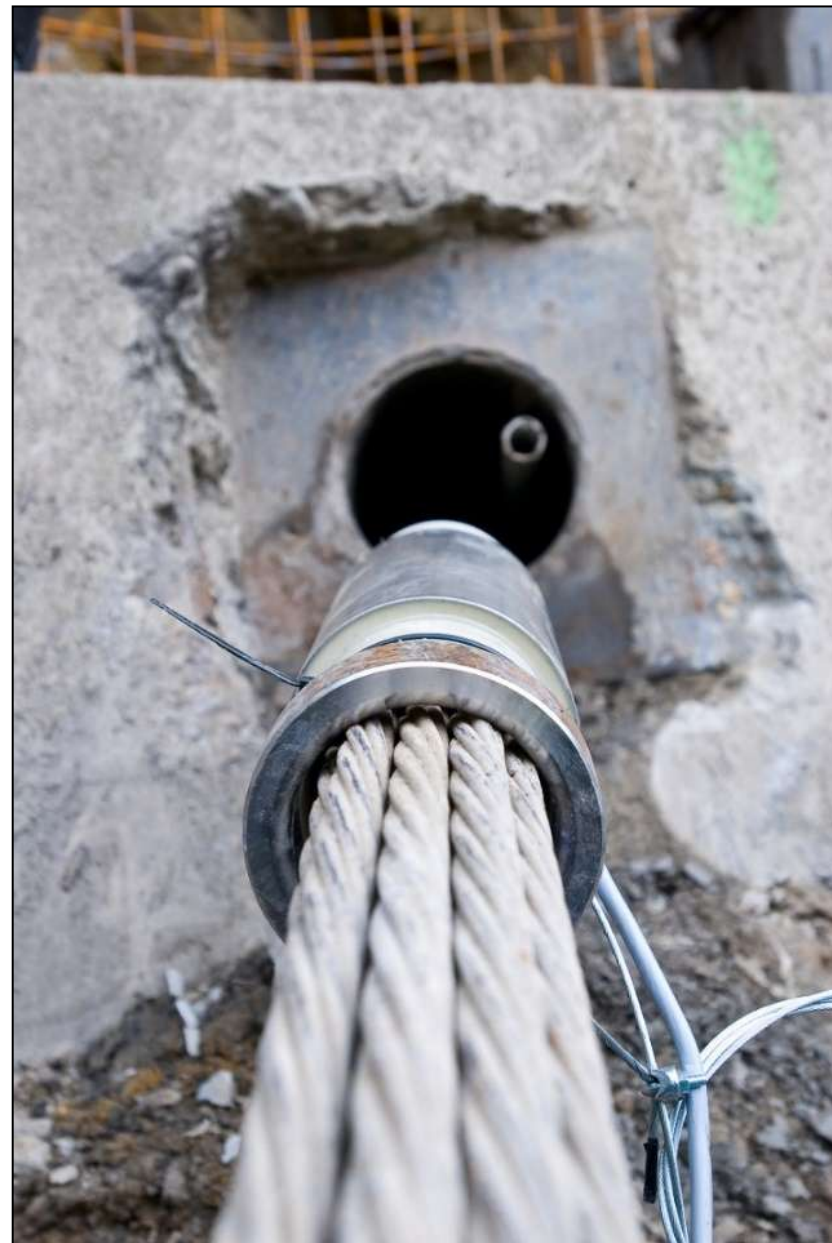
Obr. 2: Měřicí jednotka připojená ke snímačům



Obr. 3 Změna hysterezní smyčky lana



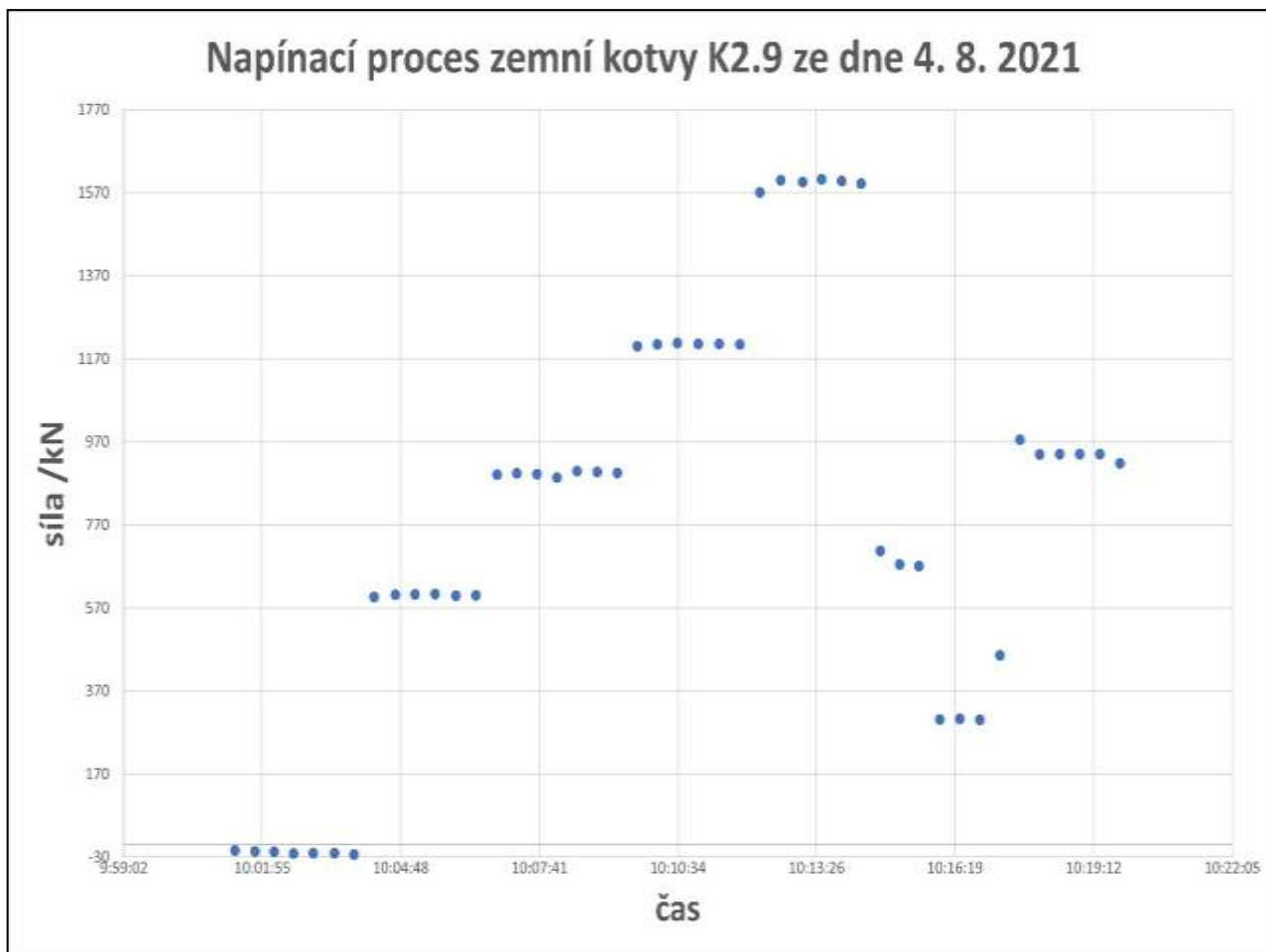
Obr. 4 Umístění snímače na zemní kotvě



Obr. 5 Snímač na kotevním svazku

3. Výsledky měření

Snímače byly instalovány na 6 zemních kotvách dle výběru projektanta stavby (Obluk, 2022). Jednotlivé zemní kotvy byly ve dnech 22. 7. 2021 a 8. 5. 2022 postupně napínány v krocích 600, 900, 1200 a 1600 kN až na stanovenou zkušební sílu. Na každém kroku byla vnesená síla podržena po dobu cca 2 minuty. Zakotvení proběhlo na síle cca 900 kN. Během jednotlivých kroků byly daným hodnotám síly přiřazeny odpovídající hodnoty magnetických toků a na jejich základě byla vytvořena lineární kalibrační rovnice, následně použita pro stanovení výsledné síly po zakotvení a odpojení hydraulického napínacího zařízení. Průběh vlastního napínacího procesu graficky znázorněný na následujícím grafu umožňuje jednak sledování kvality tohoto procesu (dosažení stanovených stupňů síly a její podržení po požadované době), jednak stanovení finální síly po event. prokluzu (Obr. 6). V případě ztráty síly lze ještě provést překotvení, aniž by čelisti hydraulického zařízení změnila polohu na laně a snížily jeho mechanickou pevnost. Režimní měření, které bylo provedeno 4. 5. 2024 před zatěžovací zkouškou konstrukce a 8. 5. 2022 při této zkoušce, potvrdilo, že vnesená síla se v průběhu zatěžovací zkoušky nezměnila (Tab. 1).



Obr. 6 Průběh napínacího procesu zemní kotvy

Tab. 1 Výsledky měření

Číslo kotvy	Síla po zakotvení [kN] 21. 7. 2021	Síla po zakotvení [kN] 4. 8. 2021	4. 5. 2022 [kN]	8. 5. 2022 [kN]
K1.9	870	875	883	881
K1.11	795	784	796	798
K1.13	819	801	849	850
K2.9		909	903	904
K2.11		657	664	663
K2.13		607	615	615

Díky dlouhodobé životnosti v řádu desítek let může být používán pro periodická kontrolní měření, event. pro měření po případné mimořádné události, jako je např. vichřice, povodeň nebo zemětřesení (Fabo a Obluk, 2013). Při zapojení do stacionárního měřicího systému se vzdáleným řízením a automatickým přenosem dat může zasílat zprávy při překročení nastavených varovných stavů. Vzhledem k možnosti měření v dynamickém módu lze sledovat také únavu materiálu nebo překročení stanovených konstrukčních limitů. Ve spojení s dalšími monitorovacími metodami, např. geodetickými a inklinometrickými měřeními, může poskytovat komplexní informace o stavu a chování konstrukce.

References

- FABO, P., BLAŽEK, P., TKÁČ, J., OBLUK, P., TURČÁK, J. Měření vývoje sil v kotvách pomocí magnetoelastického dynamometru Dynamag. In *Sborník příspěvků 15. mezinárodního semináře Zpevňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí*, Ostrava, 2010, s. 115 – 117.
- FABO, P., OBLUK P. Meranie napätia v oceľových lanách pomocou magnetoelastického dynamometra Dynamag. In *The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS, Medzinárodný časopis DOPRAVA A LOGISTIKA*, Košice, 2013, s. 125 – 127.
- OBLUK, P., FABO, P., TKÁČ, J. Non-contact mechanical tension measurement in prestressed concrete structures. In *Concrete and Concrete Structures*, 2013, Procedia Engineering, www.elsevier.com, s. 273 – 277
- OBLUK, P. Monitorování síly pomocí měřicího systému Dynamag. In: *Inžinierske stavby / Inženýrské stavby 3/2022*, Bratislava, 2022, s. 19.

4. Závěr

Magnetoelastický měřicí systém lze s výhodou využívat pro bezkontaktní měření mechanického napětí ve feromagnetických materiálech cylindrického průřezu. Představuje tak výhodnou alternativu k běžně využívaným metodám měření síly v konstrukci, fungujícím na principu mechanického přetvoření či využívajícím hydraulický nebo pneumatický tlak. Volně vložený magnetoelastický snímač nemusí být v přímém kontaktu s konstrukcí, nijak ji neovlivňuje a nepředstavuje ohrožení její integrity (Obluk a kol., 2013). Může být proto použit i v případech, kdy výrobce certifikovaného kotevního systému nedovoluje připojení externího měřicího prvku, jako je např. extenzometr, hydraulický dynamometr apod. Snímač umožňuje měření vnesené síly v průběhu napínacího procesu i po jeho ukončení.

Autoři

¹ Pavel Obluk - INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 – Vinohrady

² Jiří Tkáč - INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 – Vinohrady