



MONITOROVÁNÍ ROZVOJE POŠKOZENÍ V BETONOVÝCH DÍLCÍCH POMOCÍ METOD NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN

MONITORING OF THE DAMAGE EVOLUTION IN CONCRETE SLABS BY MEANS OF NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY

Jan HETTLER, Jan KOBER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i

Contact e-mail: hettler@it.cas.cz

Abstrakt

Nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) je soubor moderních metod ultrazvukové defektoskopie, které umožňují vysoce citlivě zachytit vznik a rozvoj poškození i v materiálově a geometricky značně komplikovaných tělesech. Tento příspěvek se zabývá hodnocením míry poškození betonových dílců pomocí analýzy vyšších harmonických frekvencí odezvy vzorku na definované buzení. Zkoušené betonové dílce byly ohybově namáhány až do vzniku magistrální trhliny za současného monitorování amplitudově závislých spektrálních změn ultrazvukového signálu procházejícího zkoušeným dílcem. Pro porovnání byly během testů registrovány také signály Akustické Emise (AE). Metoda hodnocení vyšších harmonických složek se ukázala jako vhodná metoda NEWS pro tento typ zkoušek, zejména díky relativní jednoduchosti nezbytného experimentálního vybavení a snadné interpretovatelnosti získaných výsledků. Pozornost je věnována především citlivosti použité metody na rozvoj poškození a dále pak změnám nelineárních parametrů ve stadiích před finálním porušením zkoušených těles v korelaci se signály AE.

Klíčová slova: nelineární ultrazvuková spektroskopie, harmonická analýza, zkoušení betonu

Abstract

Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy is a set of modern and dynamic ultrasonic NDT methods. These methods provide an outstanding sensitivity that can be used to monitor the damage evolution even in very complicated materials and structures. This paper deals with the damage assessment in concrete samples using the harmonic analysis of the sample response on well defined ultrasonic excitation. The amplitude dependent spectral changes of the probing ultrasonic signals were measured during the bending loading of the tested samples. Acoustic Emission (AE) signals were also analyzed and served as a reference data for comparison. The special attention is paid to the sensitivity of the method to the localized damage evolution and to the correlation of the obtained results with monitored AE activity, especially before the final stages of the damage. Results shown that the analysis of amplitude dependent spectral changes is a promising method for the damage assessment in concrete.

Key words: nonlinear ultrasonic spectroscopy, higher harmonics, concrete testing

1. Úvod

Beton se stal během uplynulých dvou století jedním ze základních stavebních materiálů. Mnoho architektonicky významných budov, průmyslových a technických staveb je postaveno z betonu a ten se tak stal jedním z pilířů současné moderní architektury. Jde však o komplikovaný kompozitní materiál a popis jeho mechanického chování a procesů porušování je složitější než u většiny kovových materiálů. Vzhledem k jeho struktuře a vlastnostem je velice obtížné jej zkoušet pomocí konvenčních ultrazvukových defektoskopických metod (pulse-echo, průchodová metoda). Metody nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) [1], [2] dále rozšiřují možnosti ultrazvukového NDT i na strukturně velmi složité materiály jakým je právě beton [3-6]. Tato práce si klade za cíl ukázat přednosti NEWS, zejména pak analýzy vyšších harmonických složek, pro monitorování rozvoje poškození v betonových dílcích.

Beton je díky svému složení silně hysteretní materiál, který vykazuje i v nepoškozeném stavu určitou míru nelinearity [7], [8]. Jsou-li však ve zkoušeném tělese přítomny defektní zóny, stávají se dalším zdrojem nelinearity, která řádově převyšuje vlastní nelinearitu tělesa. Nelineární chování materiálu se pak při ultrazvukovém zkoušení projevuje především deformací ultrazvukových vln procházejících tělesem, což vede ke vzniku nelineárních efektů ve frekvenčním spektru přijatého signálu. Nelineárními efekty jsou v tomto případě především amplitudově závislý výskyt vyšších harmonických složek ($2f$, $3f$, ...) při monofrekvenčním buzení signálem o frekvenci f s převládajícím nárůstem lichých harmonických s rostoucí amplitudou buzení a vznik postranních pásem ($f_1 \pm f_2$, $f_1 \pm 2f_2$, ...) při současném buzení dvěma frekvencemi f_1 a f_2 .

NEWS metoda hodnocení poměru vyšších harmonických složek se pro zkoušení betonu ukázala díky své robustnosti a relativní jednoduchosti jako velmi vhodná. Jelikož jsou všechny jevy využívané v NEWS metodice amplitudově závislé, zaměřili jsme naši pozornost na amplitudové charakteristiky vyšších harmonických ($2f$, $3f$) a jejich poměr $3f/2f$ (viz [7], [9]). Výsledky analýzy vyšších harmonických pak byly korelovány s aktivitou akustické emise (AE) při zatěžování zkoušených vzorků.

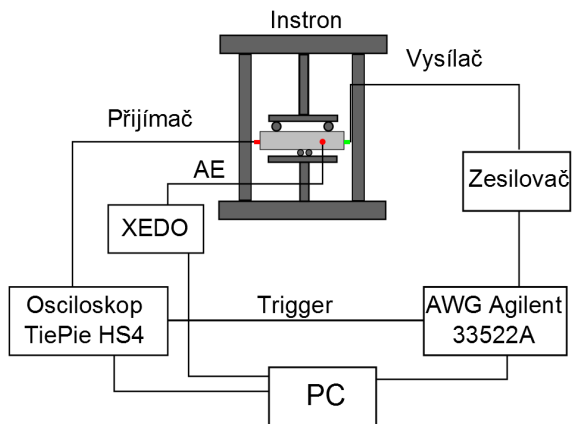
2. Experimentální zařízení

Pro zkoušení byly k dispozici kvádrové betonové vzorky o rozměrech 400x100x100 mm s definovaným složením, které byly dodány z FAST VUT v Brně. Vzorky byly ohybově namáhány v zatěžovacím stroji Instron 1195 (viz Obr. 1) až do porušení spojeného s vytvořením magistralní trhliny v centrální části vzorku. Pro monitorování rozvoje poškození byl vzorek osazen několika ultrazvukovými sondami. Na protilehlých stěnách zkoušeného vzorku byly přes kovové podložky přitmeleny epoxidovým lepidlem jak vysílací nízkofrekvenční sonda (30 kHz) tak snímače typu DAKEL MDK-13. Vysílací sonda byla buzena pulzy sestávajícími z 10 sinusových period o frekvenci 30 kHz generovanými pomocí generátoru Agilent 33522A, které byly dále zesíleny zesilovačem AR 150A. Přijímané signály byly zesíleny předzesilovačem PAC 20-40-60. Pro monitorování AE byl na vzorku umístěn další snímač MDK-13, připojený k modulárnímu analyzátoru DAKEL – XEDO. Na vstupy I/O modulu XEDO byly přivedeny analogové signály síly a posuvu ze zatěžovacího stroje. Zjednodušené schéma celé experimentální aparatury je na Obr. 2. Zatěžování vzorků probíhalo po krocích sestávajících z lineárního nárůstu na cílové zatížení a následné výdrže. Během výdrže bylo prováděno NEWS měření

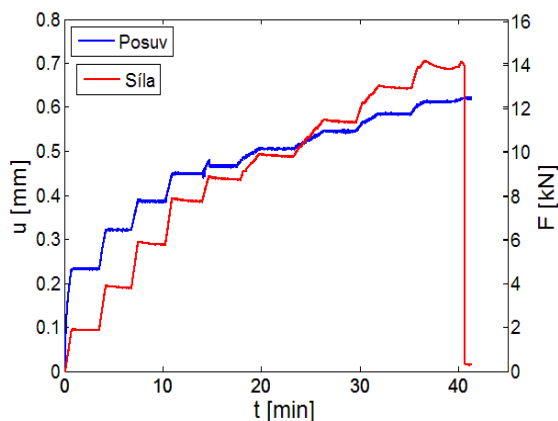
při 25 amplitudách vysílaného signálu (0.01-2 V). Zatěžování vzorku bylo nejprve řízeno silou, při vyšších hodnotách zatížení pak byl řídicí veličinou posuv. Typický průběh zatěžování je na Obr. 3. Celý experiment, s výjimkou měření AE, byl ovládán z řídicího PC pomocí software MATLAB a Instron BlueHill.



Obr. 1: Ohybové namáhání vzorku
Fig. 1: Flexural loading of the sample



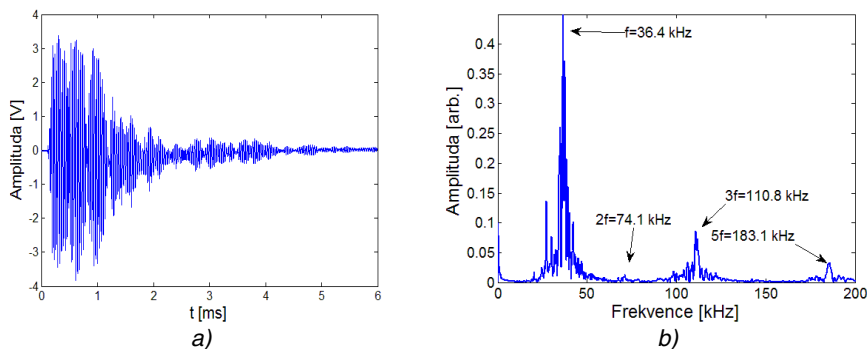
Obr. 2: Schéma experimentální aparatury pro ohybové zatěžování
Fig. 2: Schematic of the experimental assembly for flexural loading



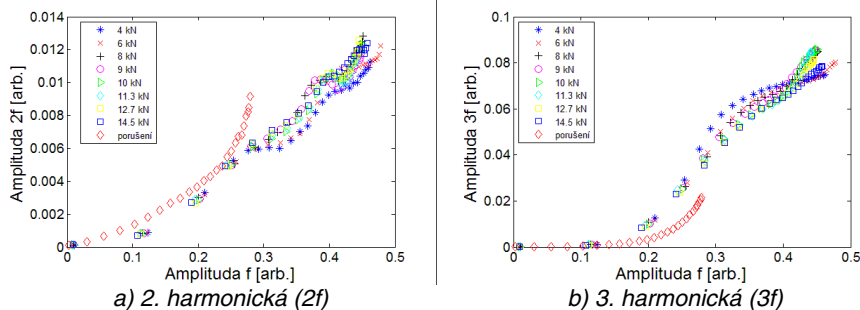
Obr. 3: Záznam průběhu zatěžování betonového vzorku
Fig. 3: Typical loading diagram of the concrete sample

3. Vyhodnocení spektrálních parametrů

Typický signál získaný při vyšší amplitudě buzení a jeho spektrum jsou vyneseny na Obr. 4. Ve spektru je zřetelně patrná přítomnost vyšších harmonických. Jejich podíl se zvyšující se amplitudou buzení roste (viz Obr. 5). Deformace měřeného signálu, patrná při amplitudách vyšších než 0.35 V, je zřejmě způsobena předzesilovačem, který při vyšších hodnotách vstupního napětí nevykazuje lineární charakteristiku a signál zkresluje. Relevantní oblast pro analýzu je tedy ohraničena výše zmíněnou hodnotou napětí.



Obr. 4: a) Přijatý signál a b) jeho spektrum - zatížení 10 kN, amplituda buzení 2 V
Fig. 4: a) Received signal and b) its spectrum - load 10 kN, excitation amplitude 2 V

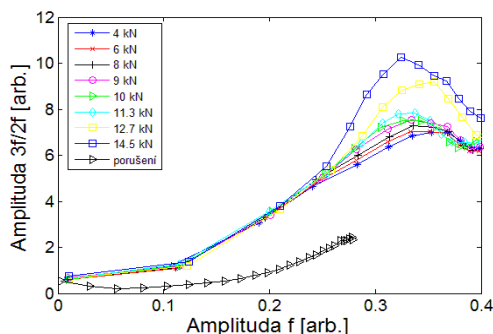


Obr. 5: Závislost harmonických na amplitudě budící frekvence f
 Fig. 5: Dependency of harmonics on the amplitude of fundamental f

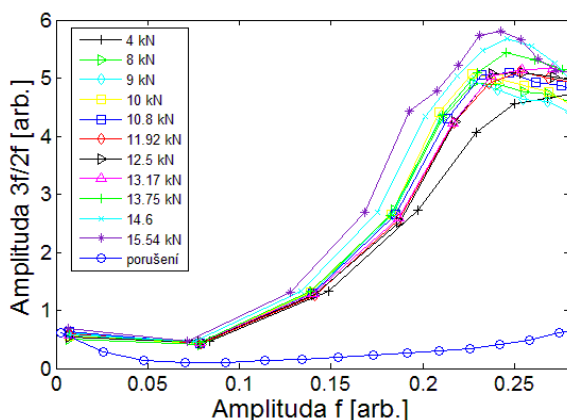
Po analýze amplitudových závislostí výšky jednotlivých spektrálních složek se jako nejvhodnější parametr, který popisuje rostoucí nelinearity a charakterizuje tedy míru poškození, jeví poměr amplitudy spektrálních složek třetí a druhé harmonické $3f/2f$.

4. Charakterizace poškození betonu parametrem nelinearity

U dvou vzorků (vzorky č. 2 a 5) byla provedena detailní analýza vyšších harmonických složek. Získané amplitudové závislosti veličiny $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f jsou pro jednotlivé vzorky a zvolené úrovně zatížení vyneseny na Obr. 6 a 7. Na závislostech u obou vzorků je patrný totožný trend nárůstu veličiny $3f/2f$ spolu s rostoucím zatížením až do bodu lokálního maxima. Při vyšší amplitudě buzení pak již dochází k postupnému poklesu nelineárního parametru. Tento efekt je zřejmě způsoben přesycením vstupu předzesilovače. Dále je patrné, zcela v souladu s teoretickými předpoklady (viz [1]), že nelinearita se začíná projevovat až od určité amplitudy buzení. Výrazně odděleny od zbytku měření jsou pak průběhy amplitudových závislostí odpovídajících konečnému porušení vzorků (vytvoření trhliny). Tento jev však nelze přisuzovat jakémukoliv změně nelinearity vzorku, ale pouze snížení amplitudy procházejícího signálu vlivem porušení soudržnosti vzorku a vytvoření nových rozhraní.

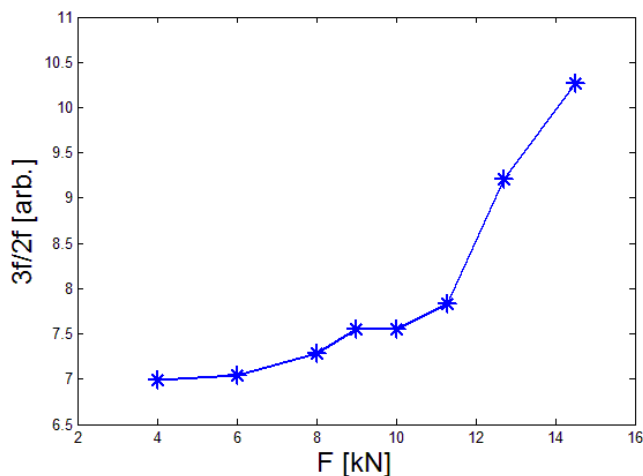


Obr. 6: Závislosti parametru $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f u vzorku č.2
 Fig. 6: Dependency of $3f/2f$ on the amplitude of fundamental f on the sample #2

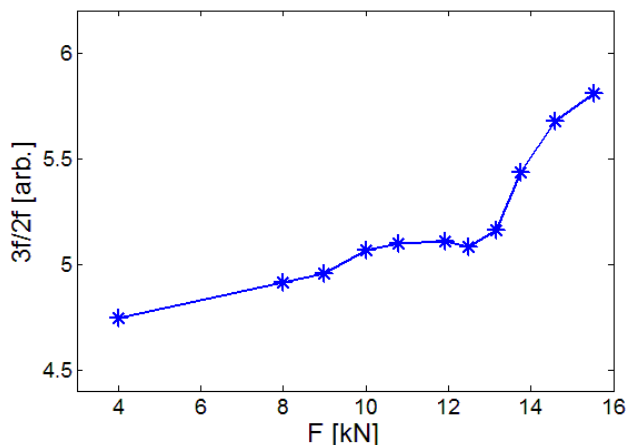


Obr. 7: Závislosti parametru $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f u vz. č.5
 Fig. 7: Dependency of the $3f/2f$ on the amplitude of fundamental f on the sample #5

Vyneseme-li maxima jednotlivých amplitudových závislostí pro odpovídající hodnotu zatížení, dostaneme křivky vynesené na Obr. 8 a 9. Tyto křivky popisují kvalitativně (pomocí jedné hodnoty) míru poškození zkoušeného vzorku pro danou hladinu zatížení. Z Obr. 7 a 8 je patrné, že charakter závislostí je u obou zkoušených vzorků velice podobný. Rozdíl v hodnotách parametru $3f/2f$ je pak zřejmě způsoben rozdílnou kvalitou akustické vazby realizované přes kovové příločky a mírně odlišným složením. Získané závislosti velmi dobře charakterizují vývoj poškození ve zkoušených betonových dílcích při ohybovém namáhání.

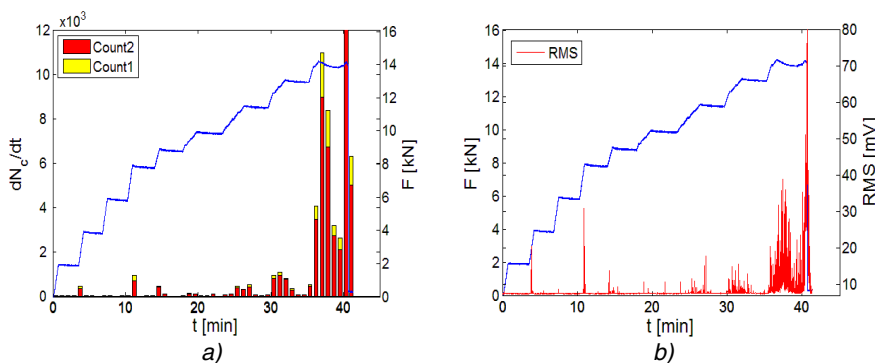


Obr. 8: Hodnota parametru $3f/2f$ v závislosti na zatížení, vzorek č. 2
 Fig. 8: Dependency of the $3f/2f$ parameter on the loading, sample no. 2



Obr. 9: Hodnota parametru $3f/2f$ v závislosti na zatížení, vzorek č. 5
 Fig. 9: Dependency of the $3f/2f$ parameter on the loading, sample no. 5

Ze získaných závislostí vyplývá, že k výraznějšímu rozvoji poškození v betonových vzorcích dochází až v posledních dvou až třech zatěžovacích krocích. Tento závěr je v dobrém souhlasu s předpoklady, jelikož zkoušené betonové dílce se při tomto typu namáhání porušují křehce. Získané výsledky velmi dobře korelují také s aktivitou AE v průběhu zatěžování. Jak je patrné z Obr. 10, nárůst emisní aktivity, vyjádřený růstem časové četnosti emisních překmitů dN_c/dt resp. hodnotou RMS , je výrazný právě v posledních dvou zatěžovacích krocích. Parametr $3f/2f$ je však schopen postihnout změny signalizující počátky rozvoje trhliny již o jeden zatěžovací cyklus dříve než AE.



Obr. 10: Záznam signálu AE a nárůstu zatížení – a) count rate, b) RMS
 Fig. 10: Record of the AE signal and loading – a) count rate, b) RMS

5. Závěry

Cílem příspěvku bylo dokumentovat citlivost metod nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) pro monitorování stavu betonových dílců. Jako vhodná metoda charakterizace poškození se ukázala jednoduchá analýza vyšších harmonických frekvencí. Výsledky získané touto metodou velice dobře souhlasí s výsledky získanými metodou AE a zároveň odpovídají předpokládanému mechanismu porušování betonových dílců namáhaných ohybem. Z výsledků je možné určit průběh rozvoje poškození a predikovat blížící se mezní stav. V současné době však nelze bez detailní znalosti struktury jednoduše porovnávat úroveň poškození jednotlivých vzorků mezi sebou a kvantifikovat míru poškození na základě porovnání zkoušeného vzorku s etalonem. Další vývoj této metody je zaměřen právě na řešení tohoto problému.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR v rámci grantu číslo GAČR 104/10/1430 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS10/302/OHK4/3T/14.

Literatura

- [1] VAN DEN ABEELE, K.; SUTIN, A.; CARMELIET, J.; JOHNSON, P. A.: Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT & E Int.*, 2001, Vol. 34, No. 4, ISSN: 0963-8695, pp. 239-248.
- [2] PŘEVOROVSKÝ, Z.: Nonlinear acoustic spectroscopy and new methods of flaw detection. In: *Proceedings of 31st Internat. Conf. on NDT/ DEFEKTOSKOPIE 2001*, Prague, ISBN: 80-214-2002-2, pp. 11-16.
- [3] VAN DEN ABEELE, K.; DE VISSCHER, J.: Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, No. 9, ISSN: 00088846, pp. 1453-1464.
- [4] LESNICKI, K. J.; KIM, J.-Y.; KURTIS, K.; JACOBS, L. J.: Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *NDT & E Int.*, 2011, Vol. 44, No. 8, ISSN: 0963-8695, pp. 721-727.
- [5] PŘEVOROVSKÝ, Z., KROFTA, J., CHLADA, M.: Nedestruktivní hodnocení stavu betonových konstrukcí metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie. (38. Mezinár. Conf. DEFEKTOSKOPIE 2008, Brno, 4.-6.11.2008)
- [6] BRUNO, C. L. E.; BOCCA, P. G.; ANTONACI, P.; GLIOZZI, A. S.; SCALERANDI, M.: Robustness of the SSM applied to damage assessment in concrete. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2010, Vol. 10, p. 045005.
- [7] NOVAK, A.; BENTAHAR, M.; TOURNAT, V.; EL GUERJOUMA, R.; SIMON, L.: Nonlinear acoustic characterization of micro-damaged materials through higher harmonic resonance analysis. *NDT & E Int.*, 2012, Vol. 45, No. 1, ISSN: 0963-8695, pp. 1-8.
- [8] BENTAHAR, M.; EL AQRA, H.; EL GUERJOUMA, R.; GRIFFA, M.; SCALERANDI, M.: Hysteretic elasticity in damaged concrete: Quantitative analysis of slow and fast dynamics. *Phys. Rev. B*, 2006, Vol. 73, No. 1, pp. 1-10.
- [9] MATYSÍK, M.; PLŠKOVÁ, I.; KOŘENSKÁ, M.: Detection of cracks in concrete using nonlinear acoustic spectroscopy methods. In: *Proceedings of DEFEKTOSKOPIE 2011 / NDE for safety (Ostrava)*, 2011, ISBN: 978-80-214-4358-7, pp. 93-100.