

NEDESTRUKTIVNÍ METODY PRO STANOVENÍ STUPNĚ DEGRADACE BETONU

NON-DESTRUCTIVE METHODS OF ASSESSING DEGRADATION OF CONCRETE

Jan PATERA*, Zbyněk HLAVÁČ*, Jindřich JANSA*

*Centrum Výzkumu Řež s.r.o.

Contact e-mail: Jan.Patera@cvez.cz

Abstrakt

Pro účely testování metod byla vyrobena sada homogenních betonových trámečků, jejíž vzorky byly vystaveny různému stupni tepelného poškození. Na vyrobených vzorcích byly testovány jak konvenční metody nedestruktivního zkoušení – měření doby průchodu signálu či rezonanční frekvence – tak metody nelineární spektroskopie elastických vln – nelineární rezonanční metoda a metoda dvoufrekvenčního směřování. Nelineární rezonanční metoda spočívá v měření frekvenční charakteristiky zkušební vzorku při nestejné budící amplitudě, zatímco metoda dvoufrekvenčního směřování je založena na vyhodnocení intermodulačního zkreslení v testovaném trámečku.

Konvenční nedestruktivní metody podávají informaci o elastických vlastnostech materiálu, metody nelineární spektroskopie jsou založeny na měření elasticko-plastické odezvy zkoušeného materiálu, jejíž plastickou složku způsobují mikrotrhliny. Část této odezvy může být způsobena nehomogenitou samotného materiálu či nelinearitou použitého zkušebního zařízení, kterou bylo potřeba při měření minimalizovat. Celková nelineární odezva se během tepelné degradace zvýšila, což odpovídá nárůstu počtu mikrotrhlin.

Naměřená data z nedestruktivních metod byla porovnána s výsledky destruktivních zkoušek na vzorcích bez tepelného poškození a na vzorcích vystavených teplotám 500°C a 600°C po dobu cca 2 hodin. Cílem tohoto příspěvku je výběr optimální metody či kombinace metod pro kontrolu degradace betonu v provozu.

Klíčová slova: beton, stárnutí betonu, degradace betonu, nedestruktivní zkoušení betonu, nelineární spektroskopie elastických vln

Abstract

For the purpose of testing the non-destructive methods, a set of homogeneous concrete prisms was produced, whose samples were subjected to different thermal damage. Conventional non-destructive testing methods – determination of ultrasonic transmission time and fundamental frequency – as well as non-linear elastic wave spectroscopy – nonlinear resonance acoustic spectroscopy and non-linear wave modulation spectroscopy methods

were tested on the produced samples. The non-linear elastic wave spectroscopy consists of measuring the frequency characteristics of the test specimen at unequal excitation amplitude while non-linear wave modulation spectroscopy is based on evaluation of the intermodulation distortion in the test specimen.

Conventional non-destructive methods provide information only about the elastic properties of the material, non-linear spectroscopy methods are based on the elastic-plastic response of the material whose plastic component is caused by microcracks. Part of this response may be caused by inhomogeneity of the material itself or the non-linearity of the test system used, which was to be minimized in the measurement. The total non-linear response increased in thermal damage, which corresponds to the increase in the number of microcracks.

Measured data from non-destructive methods were compared with the results of destructive tests on test specimens without thermal damage and on samples exposed to temperatures of 500°C and 600°C for about 2 hours. The aim of this paper is to seek an optimal method or a combination of methods for testing concrete degradation in service.

Key words: concrete, concrete aging, concrete degradation, non-destructive testing of concrete, non-linear elastic wave spectroscopy

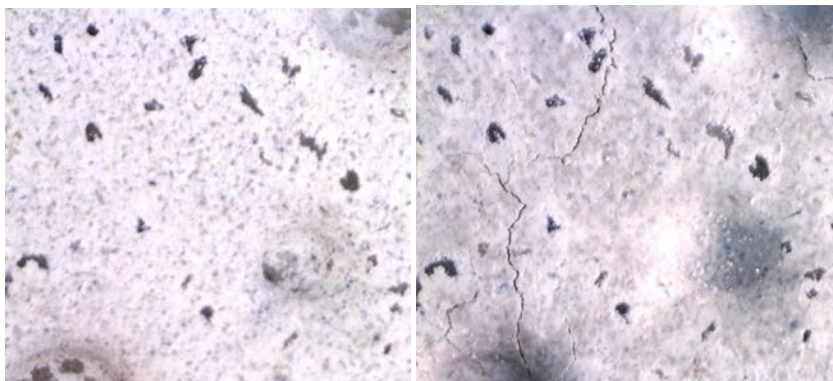
1. Úvod

Zvyšování bezpečnosti a prodloužování životnosti struktur je jedním ze základních cílů výzkumu a vývoje nedestruktivního zkoušení betonu. Mezi hlavní oblasti zkoumání patří hodnocení integrity, změna mechanických vlastností a stárnutí. Stav betonu lze zkoumat tradičními objemovými metodami, např. měřením doby průchodu a rezonanční frekvence, které poskytují osvědčené výsledky. Velmi perspektivní se zdá být rovněž ovšem skupina metod založená na hodnocení nelineární ultrazvukové odezvy, tzv. nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS).

Vyazuje-li materiál nelineární chování, znamená to, že nemá odezvu přímo úměrnou buzení. Odchylna od ideální lineární závislosti se pak označuje jako nelinearita. Na elementární úrovni je nelineární chování materiálu způsobeno superpozicí mikrotrhlin, které se vlivem akustického tlaku zavírají a otevírají. Pokud harmonická vlna přijde do styku s mikrotrhlinou, způsobí změnu její kontaktní plochy – při růstu akustického tlaku kontaktní plocha roste a při poklesu akustického tlaku klesá. Tento jev mění fázi a amplitudu signálu [1].

Pro účely porovnání metod byla vybetonována sada 9 betonových trámeček o rozměrech 40×40×160 mm z cementu CEM II 32,5, vody a normovaného křemičitého písku frakce 0÷2,5 mm. Vyrobené trámečky byly prozkoušeny metodami a následně rozděleny na 3 skupiny. První trojice vzorků byla ponechána nepoškozená jako reference, druhá skupina byla v peci vystavena teplotě 500°C po dobu 3 h a třetí skupina byla vystavena teplotě 600°C po dobu 2 h (viz obr. 1). Po vystavení tepelné degradaci byly vzorky opět prozkoušeny a následně byla

provedena destruktivní zkouška pevnosti v tahu ohybem a v tlaku na lisu Controls 50-C9030.



Obr. 1: Detail zkušebního vzorku B2 – povrch před zahřátím (vlevo), povrch po zahřátí na 600°C (vpravo)

Fig. 1: Detail of the test specimen B2 – surface before heating (left), surface after 600°C heating (right)

Po tepelné degradaci zůstala skupina vzorků vystavená 500°C kompaktní s vlásenčnicovými trhlinami o maximální šířce 0,1 ÷ 0,2 mm. Vzorky vystavené 600°C byly méně kompaktní, často se objevovaly otevřené trhliny o šířce 0,2 mm a na nejvíce poškozeném vzorku B2 až 0,3 mm.

2. Měření rychlosti průchodu

Jednou z měřených veličin je rychlost procházejících ultrazvukových (UZ) vln. Rychlost šíření UZ vln závisí na elastických konstantách prostředí a také na rozměrech prostředí. V trojrozměrném prostředí, jaké představuje těleso trámečku 40 x 40 x 160 mm, je rychlost šíření podélných vln dána vztahem:

$$v_L = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \cdot \frac{E_{bu}}{\rho} \quad (1)$$

kde E_{bu} – dynamický modul pružnosti betonu stanovený dle rychlosti ultrazvuku, ρ – hustota prostředí, μ – Poissonův poměr příčné a podélné deformace.

Modul pružnosti E_{bu} lze vyjádřit ze vztahu (1) rovnicí:

$$E_{bu} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \cdot \rho \cdot v^2, \quad (2)$$

Modul pružnosti E_{bu} určený pomocí ultrazvuku byl porovnán s moduly E_{brL} a E_{brf} stanovenými rezonanční zkouškou v další kapitole.

3. Měření rezonanční frekvence

Pro porovnání účinků tepla je vhodné použít princip rezonanční metody impakt-echo. Jedná se o poměrně nový přístup k měření rezonančních kmitočtů pevných těles o definovaných rozměrech.

Betonový trámeček 40 x 40 x 160 mm byl podepřen zhruba v polovině své délky měkkým polystyrenem, aby bylo zaručeno jeho volné kmitání. Následně byla v čele trámečku na jeho povrch umístěna akustická sonda s rozsahem měřicí frekvence 0 – 20 kHz. Na opačném konci trámečku bylo vybudeno kmitání pomocí kladívka s tuhým těžkým zakončením. Trámeček se volně rozkmital svou vlastní frekvencí. Tímto způsobem byla změřena podélná rezonanční frekvence f_L .

Obdobně bylo vybudeno i torzní kmitání a určena tzv. kroutivá frekvence f_t .

Při podepření ve čtvrtinách délky trámečku bylo možné naměřit příčnou frekvenci f_i .

Způsob buzení a umístění sond odpovídal kýžené frekvenci. Pro podélný kmitočet stálo kladívko i senzor proti sobě, na obou koncích trámečku. Při torzních kmitcích byly využívány protější rohy trámečku. Příčné kmitání bylo vybudeno a snímáno na obou volných koncích trámečku, kolmo na jeho podélnou osu.

Z každé z naměřených frekvencí bylo možno stanovit dynamický modul trámečku.

Dynamický modul pružnosti lze stanovit z podélné frekvence jako E_{brL}

$$E_{brL} = 4 \rho \cdot L^2 f_L^2, \quad (3)$$

kde L – délka trámečku, ρ – hustota prostředí, f_L – podélná rezonanční frekvence.

Dynamický modul pružnosti trámečku lze stanovit také z příčné frekvence jako E_{brf}

$$E_{brf} = 5,90 \rho \cdot L^2 f_f^2 \cdot \left(1 + 0,166 \frac{L^2}{h^2}\right), \quad (4)$$

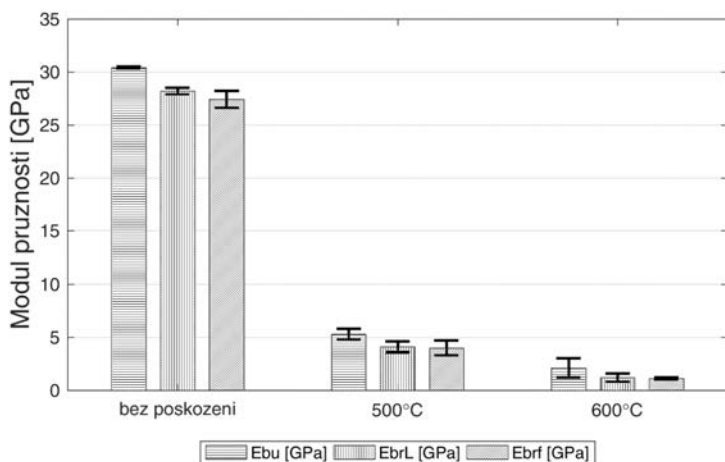
kde h – výška trámečku, f_t – příčná rezonanční frekvence.

Dynamický modul ve smyku G_{br} lze stanovit z rovnice (5),

$$G_{br} = 4 \rho \cdot 1,187 \cdot L^2 f_t^2, \quad (5)$$

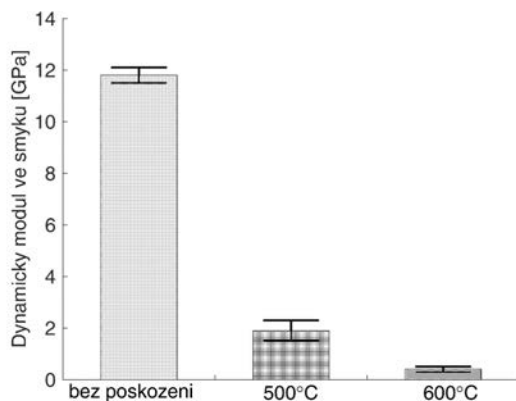
kde f_t – kroutivá (torzní) rezonanční frekvence.

Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamických modulů pružnosti E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro referenční vzorky je na obrázku 2. Dynamický modul ve smyku G_{br} je pro stejné případy znázorněn obrázkem 3.



Obr. 2: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamických modulů pružnosti E_{bu} , E_{brL} a E_{brf} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 2: Mean values and mean square errors of dynamic moduli E_{bu} , E_{brL} and E_{brf} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples



Obr. 3: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamického modulu ve smyku G_{br} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 3: Mean values and mean square errors of dynamic modulus G_{br} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Všechny měřené moduly jsou po poškození teplem 500°C resp. 600°C – 6× resp. 20× nižší oproti původním či referenčním hodnotám (obr. 2 a 3).

4. Metoda dvoufrekvenčního směšování

Principem metody dvoufrekvenčního směšování (NWMS) je míchání dvou různých budících signálů o frekvencích f_1 a f_2 uvnitř zkoušeného materiálu. Nelineární chování se při tomto typu zkoušení projevuje vznikem intermodulačního produktu f_{12} o součtové a rozdílové frekvenci $f_1 \pm f_2$. Při zkoušení bývá často zkoumán poměr amplitud vzniklého intermodulačního produktu a obou budících frekvencí, který je označován jako nelineární parametr β [2] daný vztahem:

$$\beta = \frac{A_{12}}{A_1 \cdot A_2} [V^{-1}], \quad (6)$$

kde A_{12} – amplituda intermodulační frekvence $f_{12} = f_1 \pm f_2$ [V], A_1 – amplituda odpovídající budící frekvenci f_1 [V], A_2 – amplituda odpovídající budící frekvenci f_2 [V].

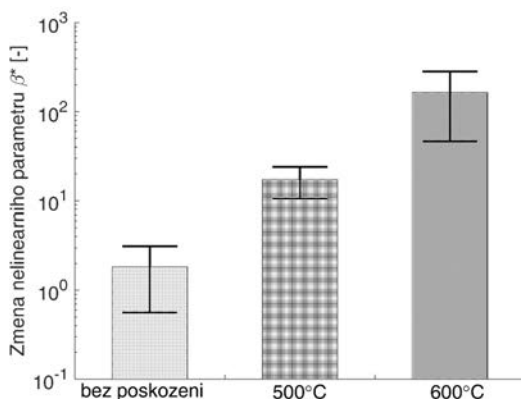
Nedostatkem vztahu (6) je závislost nelineárního parametru β na budícím napětí a rovněž nepřenositelnost naměřených výsledků na jiný měřicí systém. Nicméně je-li při následných měřeních téhož vzorku používán též měřicí systém s tímž rozmístěním piezoměničů, lze porovnáním dvou naměřených hodnot β a β' získat hodnotu změny nelineárního parametru β^* , která je bezrozměrná a nezávislá na měřicím systému:

$$\beta^* = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{A_{12}'}{A_{12}} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{A_1' \cdot A_2'} [-]. \quad (7)$$

Experimentálně byl parametr β stanoven zvyšováním amplitudy budícího signálu o frekvenci $f_1 = 153$ kHz v rozmezí 7,5–225 V na generátoru PXI-5421, který byl zesilován pomocí zesilovače AR-150A100B. Napětí na druhém budiči o $f_2 = 180$ kHz bylo generováno konstantní na 225 V stejným přístrojovým vybavením. Každý ze signálů byl samostatně zesilován a přeměňován pomocí piezoměničů Dakel MDK-13 na akustickou energii a ke směšování docházelo až v testovaném vzorku. Odezva obsahující případné intermodulační produkty byla sbírána pomocí 24 bitového osciloskopu PXI-5922 a z diskretní Fourierovy transformace jejího průběhu bylo určeno amplitudové spektrum. Ve spektru byly hledány intermodulační produkty druhého řádu způsobem, při kterém je hledáno maximum v intervalu ± 20 vzorků v okolí jejich předpokládaného výskytu $f_{12} = f_1 + f_2 = 333$ kHz.

Pokud měla závislost amplitudy intermodulačního produktu A_{12} na budící amplitudě A_1 monotónně rostoucí průběh, byla odečtena hodnota nelineárního parametru β na základě vztahu (6); byl-li pozorován pouze šum, bylo nutné měření zopakovat. Celý tento postup byl proveden 4× před poškozením a 4× po poškození vzorků v peci. Z výsledných průměrných hodnot β a β' byla podle vztahu (7) získána změna nelineárního parametru β^* .

Zkušební vzorek B2, vystavený teplotě 600°, vykazoval poškození takového rozsahu, že jej nebylo možné testovat v celém objemu, nýbrž pouze na méně poškozené polovině. Naměřená změna nelineárního parametru β^* proto mohla být u tohoto vzorku podhodnocena. Průměrná změna nelineárního parametru β^* pro skupiny podle stupně poškození je vynesena v obrázku 4.



Obr 4: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek změny nelineárního parametru β^* pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig 4: Mean values and mean square errors of non-linear parameter change β^* for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

5. Nelineární rezonanční metoda

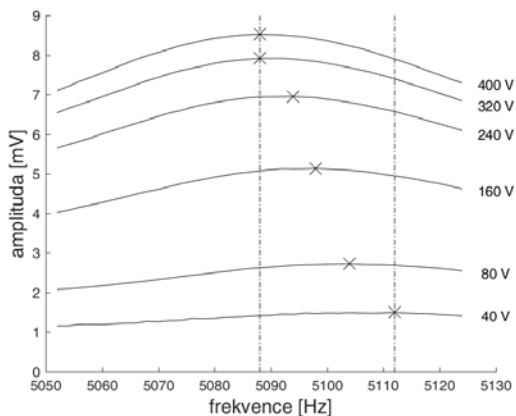
Principem nelineární rezonanční metody (NRUS) je měření frekvenčních charakteristik vzorku v určitém frekvenčním intervalu [3]. Při tomto typu zkoušení se nelineární chování projevuje poklesem rezonanční frekvence Δf_r vzorku při rostoucí budící amplitudě:

$$\Delta f_r = f_{r,max} - f_{r,min} \text{ [Hz]}, \quad (8)$$

kde $f_{r,max}$ – rezonanční frekvence při nízké budící amplitudě [Hz], $f_{r,min}$ – rezonanční frekvence při vysoké budící amplitudě [Hz].

Při experimentu byl posun rezonanční frekvence měřen na intervalu 5–20 kHz zvyšováním amplitudy budícího signálu v rozmezí 40–400 V pomocí generátoru PXI-5421. Budící signál byl zesilován pomocí zesilovače AR-150A100B a přeměňován piezoměničem Dakel DK15kryo na akustickou energii.

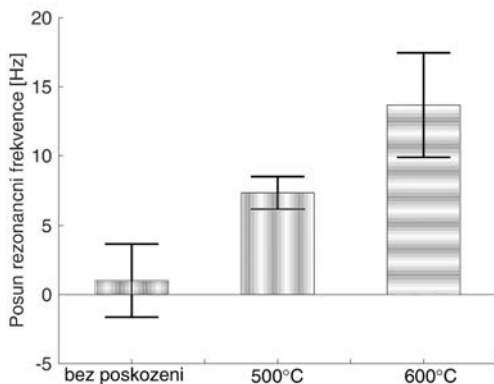
Pro měření frekvenčních charakteristik vzorků bylo použito 6 různých hodnot budícího napětí – 40, 80, 160, 240, 320 a 400 V. Pro každou z nastavených amplitud budícího signálu bylo generováno napětí harmonického průběhu kmitočtově rozmítané v diskretních krocích o velikosti 2 Hz. Během každého kmitočtového kroku byla zaznamenána odezva. Pro každou odezvu byla vypočítána efektivní hodnota jejího průběhu a z těchto hodnot bylo zkonstruováno frekvenční spektrum odezvy (viz obr. 5). Pro každý vzorek bylo měření provedeno 4× a z výsledných průměrných hodnot $f_{r,max}$ a $f_{r,min}$ byla získána hodnota poklesu rezonanční frekvence Δf_r podle vztahu (8).



Obr. 5: Posun rezonanční frekvence vzorku B2 pro budící napětí 40–400 V (označena křížkem)

Fig. 5: Resonant frequency shift at the excitation voltages 40–400 V (marked with a cross)

Trámečky bez tepelné degradace nevykazovaly prakticky žádný posun rezonanční frekvence Δf ; průměrná hodnota posunu činila 1 ± 2 Hz, což lze interpretovat jako šum. Po zahřátí na 500°C se objevila změna rezonanční frekvence 7 ± 1 Hz, po zahřátí na 600°C činil tento posun v průměru 13 ± 3 Hz. Velký rozptyl pro skupinu 600°C je způsoben nehomogenitou skupiny, jejíž vzorky vykazovaly nestejnou úroveň poškození; u nejvíce poškozeného vzorku B2 byl naměřen posun 18 Hz. Průměrné hodnoty posunu rezonanční frekvence Δf , jsou vyneseny v obr. 6.



Obr 6: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek posunu rezonanční frekvence Δf , pro vzorky poškozené 500°C , 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig 6: Mean values and mean square errors of resonant frequency shift Δf , for damage caused by the heat 500°C , 600°C and for the reference samples

6. Destruktivní zkoušky

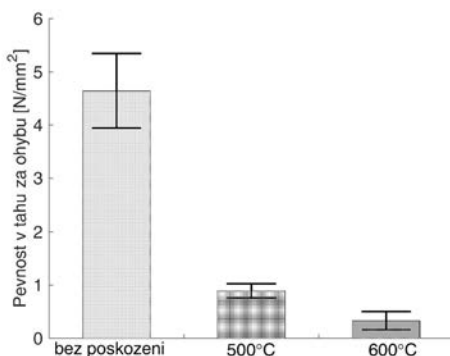
Všechny sledované trámečky byly po nedestruktivních zkouškách nejprve zlomeny třibodovým ohybem. Vzniklé zlomky byly rozmačkány v hydraulickém lisu.

Výsledkem třibodového ohybu je zvyšování napětí na krajních tažených vláknech betonového trámečku dokud nedojde k jeho porušení. Získaná hodnota je maximální síla F_{bt} . Pevnost v tahu R_{bt} je vypočítána podle vztahu (9),

$$R_{bt} = \frac{3F_{bt} \cdot L_{eff}}{2bh^2}, \quad (9)$$

kde L_{eff} – rozpětí obou podpěr trámečku při třibodovém ohybu, F_{bt} – maximální síla vyvozená uprostřed rozpětí trámečku, b a h – šířka a výška trámečku.

Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tahu R_{bt} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro referenční vzorky je na obrázku 7. Výsledky pevnosti v tlaku pro betonové trámečky poškozené teplem 500°C a 600°C jsou v obrázku 8 porovnány k referenčním hodnotám vzorků bez poškození.



Obr. 7: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tahu R_{bt} pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

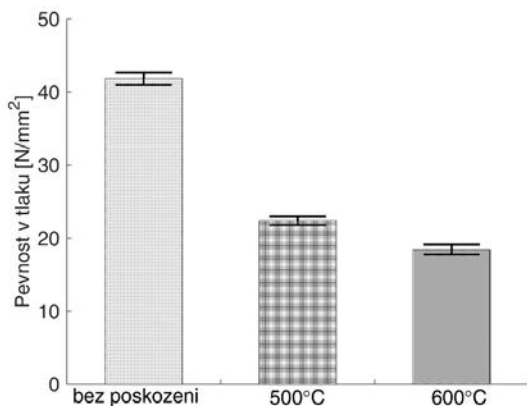
Fig. 7: Mean values and mean square errors of tensile strength R_{bt} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Z obrázku 7 je zřejmé, že po zahřátí na 500°C, resp. 600°C dosahuje pevnost v tahu zhruba pětinu, resp. desetinu původní pevnosti.

Pevnost v tlaku na zlomku R_b se vypočítá jako poměr maximální síly F_b a tlačné plochy A_{eff} .

$$R_b = \frac{F_b}{A_{eff}}, \quad (10)$$

kde F_b – maximální síla před porušením vzorku, A_{eff} – tlačná plocha vzorku.



Obr. 8: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tlaku R_b pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 8: Mean values and mean square errors of compressive strength R_b for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Hodnoty pevnosti v tlaku po 500°C, resp. 600°C jsou zhruba 2×, respektive 2,5× nižší oproti hodnotám nepoškozených vzorků.

7. Srovnání výsledků nelineárních a konvenčních metod

Výsledky modulů pružnosti z ultrazvukové zkoušky E_{bu} , z podélné respektive příčné rezonanční zkoušky E_{brL} resp. E_{brf} a smykového modulu G_{br} z torzní rezonanční zkoušky jsou shrnuty v tabulce 1. Porovnání výsledků nelineární spektroskopie NRUS, resp. NWMS (Δf_r , resp. β^*) s výsledky destruktivních zkoušek (pevnost v tahu R_{bt} a pevnost v tlaku R_b) jsou v tabulce 2.

Tab. 1: Porovnání středních hodnot dynamických modulů E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} a G_{br} pro vzorky bez poškození (28°C) se vzorky poškozenými 500°C a 600°C

Tab. 1: Mean values of dynamic moduli E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} and shear modulus G_{br} of reference samples compared with samples damaged by the heat 500°C, 600°C

T [°C]	E_{bu} [GPa]	E_{brL} [GPa]	E_{brf} [GPa]	G_{br} [GPa]
28	30,4	28,2	27,4	11,6
500	5,3	4,1	4,0	1,9
600	2,1	1,2	1,1	0,4

Tab. 2: Porovnání výsledků nelineárních nedestruktivních metod NRUS, resp. NWMS s výsledky destruktivních metod – s pevností v tahu R_{bt} a pevností v tlaku R_b pro vzorky bez poškození (28°C) se vzorky poškozenými 500°C a 600°C

Tab. 2: Results of non-linear non-destructive methods NRUS (Δf_r) and NWMS (β^*) compared to the results of destructive methods – tensile strength R_{bt} and compressive strength R_b for reference samples and samples damaged by 500°C or 600°C

T [°C]	Δf_r [Hz]	β^* [–]	R_{bt} [MPa]	R_b [MPa]
28	1	2	4,6	42
500	8	17	0,9	22
600	13	164	0,3	18

Metoda NWMS vykazuje recipročně-exponenciální závislost na pevnosti v tahu či tlaku, stejně jako na ostatních mechanických parametrech betonu (s klesajícími hodnotami běžně měřených mechanických vlastností betonu exponenciálně roste koeficient β^*). Zdá se být tedy velmi citlivým ukazatelem stavu materiálu. Šum je relativně malý, což umožňuje používat poměrně nízká budicí napětí řádově v jednotkách voltů. Na druhou stranu tento typ zkoušení umožňuje hodnotit stav betonu pouze při kontinuálním měření; jediné měření má malou výpovědní hodnotu, neboť může být ovlivněno lokálními nehomogenitami.

Metoda NRUS koreluje s naměřenými hodnotami pevnosti nepřímou úměrou a jeví se být relativně málo citlivým ukazatelem změny struktury betonu. Nízká citlivost je způsobena i poměrně vysokým šumem při stanovení frekvenčního spektra odezvy, kvůli čemuž není možné používat budicí napětí menší než desítky voltů. Výhodou této metody je, že při nízkém stupni poškození ukazuje nulovou změnu rezonanční frekvence a pro prokázání změny struktury tedy odpadá potřeba srovnávacího měření. Kromě toho je tento typ zkoušení relativně málo ovlivněn lokálními nehomogenitami.

8. Závěr

Byla vybetonována sada 9 trámečků z křemičitého písku, cementu a vody, na kterých byla testována nelineární rezonanční metoda (NRUS), metoda dvoufrekvenčního směšování (NWMS), ultrazvuková průchodová metoda a rezonanční metoda. Tyto nedestruktivní metody byly porovnány pomocí destruktivních zkoušek v tahu a v tlaku.

Na základě výsledků obou nelineárních i všech konvenčních metod je možno prokázat degradaci materiálu tepelným poškozením. Výhodou nelineárních metod oproti konvenčním metodám je vysoká citlivost na změny struktury zkoušeného materiálu. Jejich nedostatkem je vysoký šum, který omezuje dynamický rozsah

měřicího systému zdola. Shora je dynamický rozsah limitován použitými piezoměníči, které lze budít napětím maximálně ve stovkách voltů. Zvýšit dynamický rozsah systému je ovšem možné použitím předzesilovače či výkonnějších piezoměníčů typu Langevin. Nasazení metod nelineární spektroskopie v širším měřítku prozatím brání komplikovaný sběr dat a jejich další zpracování.

Tento příspěvek byl vytvořen s finanční pomocí projektu VI20152018016 z Programu bezpečnostního výzkumu České republiky 2015 - 2020 Ministerstva vnitra.

Práce byla realizována na velké infrastruktuře SUSEN, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LM2015093, vybudovaná v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Literatura

- [1] MCCALL, K., GUYER R. (1996). A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock. *Nonlinear Processes in Geophysics*, roč. 3, č. 2, s. 89–101.
- [2] VAN DER ABEELE, K., JOHNSON, P., SUTIN, A. (2000a). Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, roč. 12, č. 1, s. 17–30.
- [3] VAN DER ABEELE, K., JOHNSON, P., SUTIN, A. (2000b). Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, roč. 12, č. 1, s. 31–42.