

# VYUŽITÍ DYNAMICKÝCH NEDESTRUKTIVNÍCH METOD PRO ODHAD POŠKOZENÍ TEPELNĚ NAMÁHANÝCH SPRÁVKOVÝCH HMOT URČENÝCH K OPRAVĚ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ ■ USE OF DYNAMIC NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR ESTIMATING THE DAMAGE OF REPAIR MATERIALS FOR REPAIRING CONCRETE STRUCTURES AFTER HIGH TEMPERATURE LOADS

Jiří Brožovský

Dynamické nedestruktivní metody, konkrétně ultrazvuková impulsová a rezonanční, jsou využívány i pro hodnocení degradace stavebních materiálů, např. při stanovení odolnosti při zmrazování a rozmazování či odolnosti proti působení agresivních médií na betony. Pro zkoušky mrazuvzdornosti betonu a přírodního kamene jsou tyto metody kodifikovány v příslušné české technické normě – beton (ČSN 73 1322, ČSN 73 1380), přírodní kámen (ČSN EN 14146). Norma ČSN 73 1380 je určena k hodnocení odolnosti při zmrazování a rozmazování s ohledem na porušení vnitřní struktury betonu. V rámci výzkumu správkových malt byla ověřována využitelnost těchto metod pro hodnocení míry degradace v důsledku působení vysokých teplot, protože při působení vysokých teplot na správkové malty pro opravy betonových konstrukcí dochází k nevratným změnám v jejich vnitřní struktuře (mikrotrhliny, zvýšení pórovitosti a další defekty), které se projeví na objemové hmotnosti, pevnostech i na parametrech z měření dynamickými nedestruktivními metodami. Změny ve vnitřní struktuře správkových malt lze hodnotit na základě pevností v tlaku a tahu za ohybu nebo s využitím dynamické nedestruktivní metody. V článku jsou uvedeny poznatky o využití parametrů z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou pro srovnávací hodnocení změn ve vnitřní struktuře správkových hmot od působení vysokých teplot. Pro hodnocení těchto změn byly využity dynamické moduly pružnosti v tlaku a tahu a relativní dynamické moduly. Změny těchto parametrů jsou ve vysoké korelační závislosti se změnami objemových hmotností a pevností, které jsou důsledkem teplotních změn ve vnitřní struktuře správkových hmot. Pro posouzení míry degradace správkových hmot po působení vysokých teplot jsou využitelné obě dynamické nedestruktivní metody. V technické praxi jsou dostupnější přístroje pro měření ultrazvukovou impulsovou než pro měření rezonanční metodou. ■ Dynamic non-destructive methods, particularly ultrasonic impulse and resonance, are also used to estimate the rate of degradation of building materials, e.g. when determining the freeze-thaw resistance or resistance to aggressive media on concrete.

For tests of frost resistance of concrete and natural stone these methods are codified in the relevant Czech technical standard – concrete (ČSN 73 1322, ČSN 73 1380), natural stone (ČSN EN 14 146). Standard ČSN 73 1380 is designed to assess the freeze-thaw resistance with respect to the violation of the internal structure of the concrete. The use of these methods for the assessment of the degree of degradation due to the effects of high temperatures has been verified as part of the management mortar research, as irreversible changes in their internal structure (micro cracks, increased porosity and other defects) occur in high temperatures on repair mortars for concrete structures, which results in the density, the strength and the parameters from the measurements by dynamic non-destructive methods. Changes in the internal mortar structure can be evaluated on the basis of compressive and flexural strengths or the use of a dynamic non-destructive method. The paper presents the knowledge about the use of parameters from the ultrasonic pulse and resonance method for the comparative evaluation of changes in the internal structure of administration masses from the effects of high temperatures. Dynamic Young's moduli of elasticity and relative dynamic moduli of elasticity were used to evaluate these changes. Changes in these parameters are in high correlation with changes in bulk weights and strengths that result from temperature changes in the internal structure of building materials. Two dynamic non-destructive methods are used to assess the rate of degradation of coating materials after exposure to high temperatures. In practice, ultrasonic pulse measurement devices are more available than for resonance measurement.

Dynamické nedestruktivní metody, konkrétně ultrazvuková a impulsová metoda, jsou při zkoušení stavebních hmot využívány k stanovení dynamického modulu pružnosti, pevností materiálů, event. pro hodnocení jejich porušení. V technických normách jsou kodifikovány postupy pro různé využití uvedených metod. Pro zjišťování dynamického modulu pružnosti jsou postupy kodifikovány v ČSN 73 1371 [5] (ultrazvuko-

vá impulsová metoda) a ČSN 73 1372 [6] (rezonanční); v ČSN EN 13791 [10] je uveden základní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku betonu z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Ultrazvuková impulsová a rezonanční metoda jsou uvedeny v normách jako podpůrné metody při hodnocení mrazuvzdornosti stavebních materiálů, konkrétně pro betony v ČSN 73 1322 [7], ČSN 73 1380 [8] a pro stavební kámen v ČSN EN 12371 [9] a ČSN EN 14146 [11]. Pro hodnocení změn stavebních materiálů po působení vysokých teplot nejsou postupy pro využívání dynamických nedestruktivních metod v českých technických normách kodifikovány.

Problematika využití uvedených nedestruktivních metod pro hodnocení stavu správkových hmot na bázi silikátových pojiv s přírodním hutným kamenivem vychází z poznatků o vlivu vysokých teplot na beton, které jsou uvedeny v řadě odborných publikací, např. [1], [2], [3].

Při působení vysokých teplot na beton dochází postupně k odpařování kapilární vody, dehydrataci ettringitu a sádrovce (do 200 °C); následně dochází k porušení některých křemičitých složek (300 až 500 °C), k rozkladu portlanditu (uvolnění chemicky vázané vody) a modifikaci přeměně křemene (doprovázené zvětšením objemu křemene a belitu C<sub>2</sub>S (500 až 800 °C). Při teplotách 800 až 1 000 °C dochází k rozkladu dolomitu a vápence, čedič se taví při 1 000 až 1 200 °C a při 1 300 °C nastává úplný rozklad betonu. Popsané procesy v betonu způsobují nevratné změny v jeho vnitřní struktuře (mikrotrhliny, zvýšení pórovitosti a další defekty). Tyto defekty se projeví na fyzikálně-mechanických vlastnostech správkových hmot a zákonitě změní parametry získané vyhodnocením měření nedestruktivními metodami.

Vzhledem k tomu, že při působení vysokých teplot vznikají v materiálech na bázi portlandských cementů s přírod-

ním hutným kamenivem změny ve vnitřní struktuře ve větším rozsahu než při zkoušce mrazuvzdornosti, byla ověřována možnost využití ultrazvukové impulsové a rezonanční metody pro hodnocení změny stavu správkových hmot vystavených působení různých teplot, konkrétně 400 až 800 °C.

## PŘEHLED ČESKÝCH TECHNICKÝCH NOREM VYUŽÍVAJÍCÍCH DYNAMICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ METODY PŘI ZKOUŠENÍ MRAZUVZDORNOSTI

### Beton

V ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu [7] se uvažuje s využitím nedestruktivních metod, konkrétně rezonanční a ultrazvukové impulsové. Neuvádí se však konkrétní parametry, na základě kterých se hodnotí mrazuvzdornost betonu z měření uvedenými metodami. Uvádí se, že beton je považován za mrazuvzdorný, jestliže ukazatel nedestruktivní zkoušky dosáhl hodnoty určující mrazuvzdornost podle příslušných norem nebo předpisů.

V ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury [8] jsou z nedestruktivních metod využívány ultrazvuková impulsová a kladívková rezonanční metoda. Jsou uvedeny tři varianty zkušebních postupů zkoušení mrazuvzdornosti (zkouška na trámcih 100 × 100 × 400 mm, na desce – výřez o šířce 50 mm z krychle s délkou hrany 150 mm a zkouška CIF – krychle s délkou hrany 150 mm uprostřed rozdělená deskou z polytetrafluorethylenu). Z měření nedestruktivní metodou se vypočítá relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_n$  [%]:

$$RDM_n = \left( \frac{X_n}{X_0} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

kde  $X_n$  je parametr z nedestruktivního zkoušení po  $n$  zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech a  $X_0$  parametr z nedestruktivního zkoušení před zmrazovacími a rozmrazovacími cykly.

Norma neuvádí kritéria pro hodnocení mrazuvzdornosti na základě změn relativních dynamických modulů pružnosti.

### Stavební kámen

V ČSN EN 12371 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti [9] se uvažuje s využitím rezonanční metody dle ČSN EN 14146 [11]. Z výsledků měření se vypočítá

procentní snížení dynamického modulu pružnosti (Youngova modulu)  $\Delta E$  [%]:

$$\Delta E = \left( \frac{E_0 - E_n}{E_0} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

kde  $E_0$  je počáteční měření ve vysušeném stavu provedené před začátkem cyklů [MPa] a  $E_n$  měření po  $n$  cyklech ve vysušeném stavu [MPa]. Počet cyklů, po nichž snížení dynamického modulu pružnosti dosáhne 30 %, musí být zaznamenán.

ČSN EN 14146 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence) [11] uvádí postupy pro stanovení podélného dynamického modulu pružnosti z podélné základní rezonanční frekvence, ohybového dynamického modulu pružnosti z ohybové základní rezonanční frekvence a torzního dynamického modulu pružnosti z torzní základní rezonanční frekvence.

### METODIKA A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

V této kapitole je popsána metodika měření a zkoušek na správkových hmotách vystavených působení vysokých teplot. Měření a zkoušky byly prováděny na zkušebních tělesech – trámečcích 40 × 40 × 160 mm.

### Ultrazvuková impulsová metoda

Při měření ultrazvukovou impulsovou metodou se vycházelo z ustanovení ČSN 73 1371 [5]. Ke zkoušení byl použit ultrazvukový přístroj TICO, vlastní frekvence sond byla 150 kHz. Měření doby průchodu ultrazvukového impulsu bylo prováděno přímým prozvučováním. Z výsledků měření ultrazvukovou impulsovou metodou byly vypočítány:

- rychlost šíření ultrazvukového impulsu  $V$  [km/s],

$$V = \frac{L}{T}, \quad (3)$$

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu  $E_U$  [MPa],

$$E_U = DV^2 \frac{1}{k^2}, \quad (4)$$

- relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{UPPT,ti}$  [%],

$$RDM_{UPPT,ti} = \left( \frac{t_{S,0}}{t_{S,ti}} \right)^2 \cdot 100, \quad (5)$$

kde  $T$  je doba průchodu ultrazvukového impulsu [μs],  $L$  délka měřicí základ-

ny [mm],  $D$  objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>],  $k$  součinitel rozměrnosti prostředí,  $t_{S,0}$  počáteční doba průchodu ultrazvukových impulsů ve zkušební tělese [μs] a  $t_{S,ti}$  doba průchodu ultrazvukových impulsů po teplotním zatížení při teplotě  $t_i$  ( $i = 400, 600$  a  $800$  °C) [μs].

### Rezananční metoda

Vzhledem k tomu, že bylo použito zařízení pro rezonanční kladívkovou metodu RT-1, bylo měření prováděno v souladu s ASTM 215 [4] (dynamické moduly pružnosti) a ČSN 73 1380 [8] (relativní dynamický modul pružnosti). Vyhodnocení bylo prováděno v souladu s ČSN 73 1372 [6] a ČSN 73 1380 [8].

Z výsledků měření ultrazvukovou impulsovou metodou byly vypočítány:

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu podélného kmitání  $E_{rL}$  [MPa]

$$E_{rL} = 4L^2 f_L^2 D, \quad (6)$$

- dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání  $E_{rf}$  [MPa]

$$E_{rf} = 0,0789c_1 L^4 f_f^2 D \frac{1}{i^2}, \quad (7)$$

- dynamický modul pružnosti ve smyku  $G_r$  [MPa]

$$G_r = 4kL^2 f_t^2 D, \quad (8)$$

- dynamický Poissonův koeficient  $\nu_r$  [-]

$$\nu_r = \frac{1}{2} \left( \frac{E_r}{G_r} - 2 \right), \quad (9)$$

- relativní dynamický modul pružnosti  $RDM_{FF,ti}$  [%]

$$RDM_{FF,ti} = \left( \frac{f_{ti}}{f_0} \right)^2 \cdot 100, \quad (10)$$

kde  $f_L$  je první vlastní kmitočet podélného kmitání [kHz],  $f_f$  první vlastní kmitočet příčného kmitání [kHz],  $f_t$  první vlastní kmitočet kroutivého kmitání [kHz],  $L$  délka zkušebního tělesa [m],  $D$  objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>],  $c_1$  korekční součinitel zahrnující vliv smyku a setrvačných momentů při kmitání zkušebního tělesa,  $i$  poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušebního tělesa,  $k$  součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušebního tělesa,  $E_r$  dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu z měření rezonanční metodou [MPa],  $f_{ti}$  vlastní frekvence měřená po teplotním zatížení při teplotě  $t_i$  ( $i = 400, 600$  a  $800$  °C) [kHz] a  $f_0$  je počáteční vlastní frekvence [kHz].

**Ostatní zkoušky správkových hmot**

Pevnost v tlaku a objemová hmotnost byly měřeny dle postupu v ČSN EN 12190 [12] a pevnost v tahu za ohybu dle postupu v ČSN EN 196-1 [13].

**Správkové hmoty, teplotní zatěžování a měření**

Pro experimentální práce byly zvoleny čtyři druhy správkových hmot:

- SI – pojivo portlandský cement CEM I 42,5R, plnivo normalizovaný křemičitý písek,  $W/C = 0,5$ ,
- SII – pojivo hlinitanový cement, plnivo normalizovaný křemičitý písek,  $W/C = 0,4$ ,
- SIII – pojivo portlandský směsný cement CEM II/B-M(S-LL) 32,5R, přírodní drcené kamenivo 0/2 mm,  $W/C = 0,43$ , polymerní přísada Vinnapas a polypropylenová vlákna Fibrin 315,
- SIV – průmyslově vyráběná reprofilační malta s cementovým pojivem, zúšlechťená umělými hmotami a umělými vlákny.

Protože cílem prací bylo ověřit užiti dynamických nedestruktivních metod pro srovnávací hodnocení změny stavu vnitřní struktury správkových hmot od účinků vysokých teplot, zkušební vzorky byly vystaveny působení teplot 400, 600 a 800 °C; izotermická výdrž při dané teplotě byla 60 min.

Z každé správkové hmoty byly vyrobeny čtyři sady ze tří zkušebních těles (srovnávací vzorky nevystavené teplotnímu zatížení pro stanovení pevností; po jedné sadě pro každou teplotu). Na vzorcích určených pro teplotní zatěžování byla před a po teplotním zatížení prováděna měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou a stanovení objemové hmotnosti; po teplotním zatížení byly zjišťovány pevnosti.

**VÝSLEDKY ZKOUŠENÍ**

V tab. 1 jsou uvedeny výsledky z měření nedestruktivními metodami a zkoušek pevností před teplotním zatížením a po působení teplot 400 až 800 °C.

V tab. 2 jsou uvedeny relativní dynamické moduly a rozdíly rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti před a po teplotním zatěžování. Rozdíly mezi uvedenými parametry byly vypočítány ze vztahu (11) a jsou vyjádřeny v %.

$$\delta Z = \frac{Z_0 - Z_i}{Z_0} \cdot 100, \quad (11)$$

kde  $Z_0$  je parametr z nedestruktivní

Tab. 1 Výsledky měření dynamickými nedestruktivními metodami a zkoušek pevností ■ Tab. 1 Results of measurements of the dynamic non-destructive methods and strength tests

$t$	$D$	$V$	$E_u$	$T$	$E_{crl}$	$E_{crl}$	$f_i$	$R_t$	$R_c$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[km/s]	[GPa]	[ms]	[GPa]	[GPa]	[kHz]	[MPa]	[MPa]
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SI</b>									
20	2 230	4,41	43,3	36,2	41,5	39,0	5,69	8,8	61,4
400	2 070	3,19	21,1	50,0	20,1	18,8	4,12	7,4	45,6
600	2 043	1,88	7,2	84,5	6,2	5,9	2,39	2,8	30,0
800	2 016	1,48	4,4	108,3	3,3	2,7	1,54	0,4	9,9
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SII</b>									
20	2 259	4,55	46,8	35,3	43,0	41,9	5,82	9,3	77,6
400	2 070	2,19	10,0	73,2	9,8	9,5	3,00	2,7	24,2
600	2 069	1,69	5,9	95,3	5,3	5,4	2,23	1,5	22,5
800	2 056	1,33	3,6	120,8	3,0	3,0	1,66	1,3	21,0
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SIII</b>									
20	2 160	3,99	34,4	40,0	30,4	29,2	4,98	7,5	40,2
400	1 993	2,71	14,7	58,6	13,0	11,7	3,34	4,3	35,4
600	1 969	1,43	4,1	111,9	3,2	3,2	1,71	2,1	24,6
800	1 903	0,97	1,8	166,2	1,5	1,4	1,18	0,8	10,1
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SIV</b>									
20	2 130	4,30	39,4	37,5	34,4	34,3	5,36	7,9	62,6
400	1 907	3,27	20,4	49,1	14,6	14,4	3,75	7,2	54,0
600	1 884	2,09	8,3	77,1	6,2	6,1	2,39	3,9	31,1
800	1 854	1,76	5,8	91,6	3,6	3,5	1,82	1,2	15,5

ho zkoušení ( $V, E_u, E_{rl}, E_{rf}$ ), resp. pevnost před vystavením působení teplotního zatížení,  $Z_{ti}$  parametr z nedestruktivního zkoušení, resp. pevnost po působení teplotního zatížení  $t_i$  ( $i = 400, 600$  a  $800$  °C).

Pro ilustraci je v obr. 1 znázorněno porovnání změn jednotlivých parametrů z měření dynamickými metodami, pevností a relativních dynamických modulů v závislosti na působící teplotě pro správkovou hmotu SI.

**DISKUSE K DOSAŽENÝM VÝSLEDKŮM**

Pro zhodnocení využitelnosti ultrazvukové impulsové a rezonanční metody k posuzování stavu správkových hmot, které byly vystaveny účinkům vysokých

teplot, byly vypočítány rozdíly mezi dynamickým, resp. relativním dynamickým modulem pružnosti z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou  $\Delta DM$  [%]:

$$\Delta DM = \frac{DM_u - DM_r}{DM_u} \cdot 100, \quad (12)$$

kde  $DM_u$  je dynamický, resp. relativní dynamický modul z měření ultrazvukovou impulsovou metodou [GPa],  $DM_r$  dynamický, resp. relativní dynamický modul z měření rezonanční metodou [GPa].

Percentuální rozdíly mezi dynamickým, resp. relativním dynamickým modulem z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 2 Relativní dynamické moduly a rozdíly rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a dynamických modulů pružnosti před a po teplotním zatěžování ■ Tab. 2 Relative dynamic moduli of elasticity and differences in ultrasonic pulse velocity and relative dynamic moduli of elasticity before and after thermal loading

$t$	$RDM_{UPPT}$	$RDM_{UPPT}$	$\delta R_t$	$\delta R_c$	$\delta V$	$\delta E_u$	$\delta E_{rl}$	$\delta E_{rf}$
[°C]	[%]							
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SI</b>								
400	52,4	52,4	-15,3	-26,7	-27,6	-51,4	-50,8	-51,3
600	18,1	17,3	-68,1	-53,0	-57,5	-83,5	-85,2	-85,0
800	11,4	7,4	-94,0	-87,0	-66,3	-89,7	-92,1	-93,1
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SII</b>								
400	23,3	26,2	-70,9	-68,8	-51,7	-78,5	-77,4	-77,3
600	13,7	14,8	-83,6	-71,0	-62,9	-87,5	-87,7	-87,1
800	8,6	8,2	-86,3	-73,0	-70,7	-92,2	-93,0	-92,8
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SIII</b>								
400	46,7	44,3	-42,6	-12,0	-31,6	-57,1	-57,2	-59,7
600	12,7	11,9	-72,6	-38,9	-64,4	-88,5	-89,8	-89,4
800	5,9	5,7	-88,8	-74,8	-75,7	-94,8	-95,0	-95,1
<b>SPRÁVKOVÁ HMOTA – SIV</b>								
400	58,6	59,6	-9,2	-13,7	-23,5	-57,4	-56,9	-57,4
600	23,6	21,9	-50,6	-50,3	-51,4	-83,2	-81,8	-82,2
800	16,7	14,3	-83,6	-75,2	-59,1	-87,5	-89,8	-90,0

Literatura:

[1] AWOYERA, P. O., AKINWUNJI, I. I., EDE, A. E., OLOFINNADE, M. O. Forensic Investigation of Fire-affected Reinforced Concrete Buildings. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 17–23.

[2] MOHAMED SUTAN, N., JAAFAR, M. S. Evaluation efficiency of nondestructive detection of flaws in concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2003, Vol. 39, No. 2, pp. 87–93.

[3] OLOWOFOYEKU, A. M., OLUTOGE, F. A. Domestication Of Pundit Non-Destructive Test Chart In Measuring Compressive Strength Of Normal Strength Concrete Subjected To Elevated Temperature. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013, Vol. 7, No. 1, pp. 1–6.

[4] ASTM C215-14. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

[5] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2011.

[6] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2012.

[7] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1968.

[8] ČSN 73 1380. *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury*. Praha: ČNI, 2007.

[9] ČSN EN 12371. *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti*. Praha: ÚNMZ, 2010.

[10] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: ČNI, 2007.

[11] ČSN EN 14146. *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní rezonanční frekvence)*. Praha: ČNI, 2005.

[12] ČSN EN 12190. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt*. Praha, 1999.

[13] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: ÚNMZ, 2016.

Tab. 3 Percentuální rozdíly mezi moduly pružnosti z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou

Tab. 3 Percentage differences between the moduli of elasticity from the ultrasonic pulse and resonance method

t [°C]	Správková hmota – SI			Správková hmota – SII			Správková hmota – SIII			Správková hmota – SIV		
	$\Delta E_{U-rL}$	$\Delta E_{U-rf}$	$\Delta RDM$	$\Delta E_{U-rL}$	$\Delta E_{U-rf}$	$\Delta RDM$	$\Delta E_{U-rL}$	$\Delta E_{U-rf}$	$\Delta RDM$	$\Delta E_{U-rL}$	$\Delta E_{U-rf}$	$\Delta RDM$
400	-0,6	-0,1	0	-1,1	-1,2	-2,9	0,2	2,6	2,4	-0,4	0,1	-1,1
600	1,7	1,5	0,8	0,2	-0,4	-1,0	1,4	0,9	0,8	-1,4	-0,9	1,7
800	2,4	3,4	3,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,3	0,2	2,3	2,5	2,4
$\sigma$	1,2	1,6	1,6	-0,1	-0,3	-1,2	0,6	1,3	1,1	0,2	0,5	1,0

Z analýzy výsledků měření vyplynulo:

- se zvyšující se působící teplotou dochází k poklesům jak parametrů z nedestruktivního zkoušení, tak i pevností. Míra poklesu pevnosti v tlaku a tahu za ohybu je různá; pokles pevností v tahu za ohybu na rozdíl od pevnosti v tlaku vykazuje stejné trendy jako pokles parametrů z nedestruktivního zkoušení, což lze vysvětlit tak, že tahové pevnosti jsou více ovlivňovány defekty ve vnitřní struktuře správkových hmot,
- nejsou zásadní rozdíly mezi dynamickými moduly pružnosti z měření ultrazvukovou impulsovou a rezonanční metodou. Průměrné rozdíly se pohybují v rozmezí -1,2 až 1,6 % a z hlediska interpretace výsledků měření jsou nevýznamné,

- při stanovení dynamického modulu pružnosti z měření ultrazvukovou impulsovou metodou je nezbytné stanovit rychlost šíření ultrazvukového impulsu a objemovou hmotnost správkové hmoty,
- náročnější je stanovení dynamických modulů z měření rezonanční metodou. Zde je nezbytná teoretická příprava měření (očekávané frekvence, poměry frekvencí) a v případě, že je využíván pro hodnocení dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu z prvního vlastního kmitočtu příčného kmitání, je výpočet složitější.

ZÁVĚR

Ultrazvuková impulsová metoda i rezonanční metoda jsou využitelné pro orien-

tační, tzv. porovnávací hodnocení míry degradace správkových hmot vystavených působení vysokých teplot.

V technické praxi jsou dostupnější přístroje pro měření metodou ultrazvukovou impulsovou než pro měření rezonanční metodou.

Z praktického hlediska se jeví jako nejvhodnější veličina pro hodnocení správkových hmot po působení vysokých teplot relativní dynamický modul pružnosti. Při měření ultrazvukovou impulsovou metodou je dostačující zjištění pouze doby průchodu ultrazvukového impulsu a při měření kladívkovou rezonanční metodou se zjišťuje pouze první vlastní frekvence příčného kmitání.

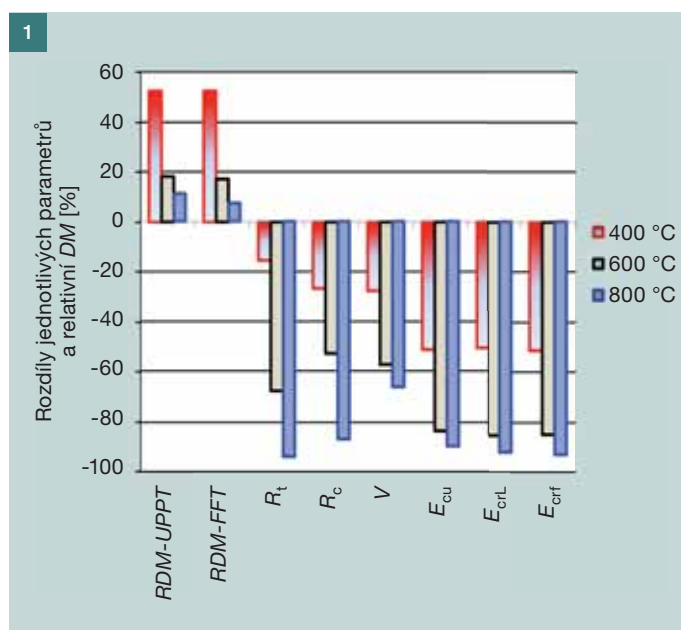
Uvedené metody a postupy budou využity při řešení problematiky související s dynamikou degradace cementových kompozitů modifikovaných sekundární krystalizací.

Článek byl vytvořen s finanční podporou projektu GA ČR 16-25472S „Dynamika degradace cementových kompozitů modifikovaných sekundární krystalizací“ a v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu Národní program udržitelnosti I.

doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
e-mail: brozovsky.j@fce.vutbr.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem. The text was reviewed.



Obr. 1 Porovnání změn jednotlivých parametrů z měření dynamickými metodami, pevností a relativních dynamických modulů v závislosti na působící teplotě – správková hmota SI

Fig. 1 Comparison of changes of the particular parameters of measurement by dynamic methods, changes of strength and relatives dynamic moduli depending on the temperature-repair mortar SI