

HODNOCENÍ POŠKOZENÍ BETONU ZMRAZOVACÍMI A ROZMRAZOVACÍMI CYKLY POMOCÍ DETAILNÍ ANALÝZY SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE

Tomáš Vymazal, Luboš Pazdera, Libor Topolář, Dalibor Kocáb

Článek se zabývá využitím metody akustické emise při posuzování míry poškození betonu během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Při zkoušce mrazuvzdornosti betonu byla kromě standardních metod – sledování poklesu pevnosti v tahu ohybem či dynamických modulů pružnosti – využita metoda akustické emise. Měření akustické emise probíhalo přímo během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Výsledky ukazují, že přestože mechanické vlastnosti použitého betonu se během zatěžování zmrazovacími a rozmrazovacími cykly téměř nemění, akustická emise jednoznačně odhaluje změny a porušení ve vnitřní struktuře betonu.

DETERMINATION OF THE DEGREE OF DAMAGE TO CONCRETE BY FREEZE-THAW CYCLES USING DETAILED ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

The paper deals with the use of the acoustic emission method to assess the degree of damage to concrete during freeze-thaw cycles. Testing of frost resistance included not only standard methods – decrease of flexural strength or dynamic modulus of elasticity – but also the acoustic emission method. The acoustic emission measurement was conducted during the freeze-thaw cycles. The results indicate that while the mechanical properties of concrete remain almost unaffected during the exposure to freeze-thaw cycles, the acoustic emission clearly reveals changes and damage in the internal structure.

Betonové konstrukce jsou v průběhu své životnosti vystaveny různým degračním faktorům, jako jsou mechanické a chemické vlivy, rychlé změny teplot apod. Znalost vlivu teplotních změn na kvalitu betonu v průběhu jeho životnosti je nezbytná, a to jak z hlediska vědeckého, tak i z hlediska stavební praxe. Vedle degračních procesů způsobených vysokými teplotami je střídání kladných a záporných teplot jedním z nejničivějších provozních faktorů pro mnoho betonových výrobků [1], [2]. Zmrazovací a rozmrazovací (anglicky freeze-thaw, dále též F-T) cykly mohou velmi nepříznivě a také velmi rychle ovlivnit trvanlivost beto-

nových konstrukcí. Z hlediska výzkumu je vhodné sledovat chování betonu již v průběhu vlastního zatěžování F-T cykly [4], [3], [5].

V případě betonu, který je v kontaktu s vodou (příkladem takových konstrukcí mohou být kolejové pražce, silniční panely, vodní nádrže, cementobetonové kryty apod.), se vlivem kapilarity dostane voda do pórové struktury betonu. Při záporných teplotách okolního prostředí se voda začne měnit na ledovou tříšť a poté na led, který má větší objem než voda o přibližně 9 %. Toto nabývání vody uvnitř struktury betonu vytváří tlaky, které mohou beton výrazně a nevratně poškodit [6].

Posuzování odolnosti betonu proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům je obvykle založeno pouze na sledování určitých mechanických vlastností, jako jsou pevnosti, moduly pružnosti apod. Tyto vlastnosti jsou získávány po uplynutí určitého počtu F-T cyklů destruktivními nebo nedestruktivními metodami. Následně je vyhodnocena jejich změna (často pokles) vzhledem k hodnotám zjištěným před zmrazováním [7]. U destruktivních zkoušek tedy není monitorován vzorek kontinuálně, ale chování betonu se posuzuje na základě výsledků jednotlivých zkušebních těles. Přestože zkušební tělesa tvoří jednu sadu stejně vyrobených těles ze stejného betonu, může to vést k nepřesným závěrům. Odhad chování betonu je totiž vytvořen pomocí statistické interpretace výsledků podobných, ale ne zcela stejných těles. Při použití metod nedestruktivního testování [8] až [11] je sledování stavu vzorku betonu prováděno na týchž tělesech – změna zjišťované vlastnosti je zaznamenávána na



1



2

1 Výroba zkušebního betonového bloku

2 Odběr jádrových vývrtů z bloku

3 Uspořádání zkušebních těles se snímači AE v zařízení KD 20 během F-T cyklů

1 Production of the concrete block for the tests
2 Drilling of core samples from the block
3 Arrangement of the test specimens with AE sensors in the KD 20 equipment during F-T cycles



3

jednotlivých tělesech v průběhu zkoušky v diskrétních časových intervalech (vždy po určitém počtu provedených F-T cyklů). Jedná se o proces zatížení menší chybou, než jsou destruktivní způsoby zkoušení. Ideální je však sledovat zkušební tělesa kontinuálně i během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, tedy v průběhu celého testování. Tento přístup umožňuje metoda akustické emise. Analýzu zaznamenaných signálů akustické emise lze úspěšně využít pro detailnější hodnocení chování zkoušených materiálů [12], [13].

Akustická emise (AE) je metoda ne-destruktivního testování v reálném čase, kterou lze použít ke sledování vzniku trhlin v betonu [14]. Signály AE odpovídají zvukovým vlnám, které vznikají při tvorbě trhlin v materiálu. Když se v betonu vytvoří trhlina, uvolní se energie a část této energie se rozptýlí jako akustická vlna [15], [16]. Akustické vlny a odpovídající energie jsou tedy uvolňovány i při vzniku poškození materiálu v důsledku F-T cyklů [3], [17], [18]. Parametry AE signálů (např. počet překmitů, amplituda, frekvence a další) mohou poskytnout účinný způsob, jak určit míru porušení materiálu při F-T cyklech [19]. Obecně platí, že síla AE signálů a jejich parametry závisí na množství uvolněné energie, zdroji, vzdálenosti a orientaci zdroje vzhledem k umístění AE snímačů [20]. Zkoušení metodou AE spočívá v tom, že snímače AE nepřetržitě snímají AE signály, které jsou generované tvorbou porušení materiálu během jeho namáhání (např. F-T cykly). V kompozitních materiálech na bázi cementu se může zdroj aktivit AE nacházet buď v cementovém pojivu, anebo v mezifázové přechodové zóně (ITZ) [20].

Primárním cílem tohoto příspěvku je porovnání chování různě velkých zkušebních těles (vyrobených z jádrových vývrtů odebraných z betonového bloku) v průběhu zmrazování a rozmrazování. Interpretace odolnosti betonu proti působení mrazu bude provedena pomocí výstupů metody akustické emise, resp. pomocí analýzy AE signálů generovaných v průběhu 100 F-T cyklů. Pro srovnání budou uvedeny i výsledky tradičních nedestruktivních i destruktivních zkoušek, které byly provedeny po každém 25. F-T cyklu. Jedním ze sekundárních cílů popisovaného experimentu bylo stanovit, jakým způsobem lze zaznamenat první změny v kvalitě betonu či první náznaky porušení vnitřní struktury betonu při jeho namáhání zmrazovacími a rozmrazovacími cykly.

Popis a nastavení experimentu

Pro experimentální práce byl zvolen provzdušněný beton, u kterého byl předpoklad, že se bude porušovat vlivem F-T cyklů pouze minimálně a především velmi pozvolna. Složení použitého betonu je uvedeno v tab. 1. Vodní součinitel betonu měl hodnotu 0,46. U čerstvého betonu byly stanoveny základní vlastnosti: objemová hmotnost dle [21] byla $2\,290\text{ kg/m}^3$, rozlité dle [22] bylo 460 mm, sednutí dle [23] bylo 180 mm, obsah vzduchu dle [24] byl 5 % a teplota čerstvého betonu byla $28\text{ }^\circ\text{C}$.

Z provzdušněného betonu byl v exteriéru na volném prostranství vyroben betonový blok výšky 2,4 m o půdorysných rozměrech $1,8 \times 0,45\text{ m}$ (obr. 1). Betonáž byla provedena ve svislém směru do stěnového bednění a beton byl hutněn pomocí ponorného vibrátoru. Po betonáži byl blok přikryt vlhkou tkani-

Tab. 1 Teoretické složení betonu

Tab. 1 Theoretical composition of the concrete

Složka	Množství [kg / 1 m ³ čerstvého betonu]
cement CEM I 42,5 R	390
jemné kamenivo 0–4 mm	810
hrubé kamenivo 4–8 mm	160
hrubé kamenivo 8–16 mm	760
voda	185
superplastifikační přísada	1,0
provzdušňovací přísada	0,6
plastifikační a stabilizační přísada	1,6

nou a následně PE fólií. Během prvních dvou dnů po betonáži byla tkanina pod PE fólií pravidelně zvlhčována. Betonový blok byl v bednění ponechán jeden týden, poté bylo bednění odstraněno a beton bloku nebyl dále nijak ošetřován. Jádrové vývrtky, z nichž byla připravena zkušební tělesa, byly odebrány přibližně dva měsíce po betonáži (obr. 2).

Z betonového bloku byly mimo jiné odebrány jádrové vývrtky průměru 100 a 150 mm, všechny s jednotnou délkou 450 mm (šířka bloku). Z nich byla vyrobena řezáním na diamantové okružní pile za stálého chlazení vodou zkušební tělesa tvaru válců i hranolů. Pro popisovaný experiment byly připraveny čtyři sady zkušebních těles – válce průměru i délky 100 mm (označeny CS100), válce průměru i délky 150 mm (označeny CS150), válce průměru 100 mm a délky 400 mm (označeny C400) a také hranoly $95 \times 95 \times 380\text{ mm}$ (vyřezány z jádrového vývrtu průměru 150 mm, označeny P95). Každá sada byla tvořena devíti kusy zkušebních těles, které byly rozděleny do tří skupin po třech. První skupina byla tělesa referenční, ta nebyla podrobena zmrazování a rozmrazování. Druhá skupina těles byla zatížena pomocí 50 F-T cyklů a poslední, třetí skupina těles byla zatížena pomocí 100 F-T cyklů. U jednotlivých sad zkušebních těles byly sledovány různé parametry a jejich vývoj vzhledem k počtu provedených F-T cyklů. U sad CS100 a CS150 byla zjišťována pevnost v příčném tahu dle [25] a na těchto tělesech bylo také aplikováno měření pomocí metody AE v průběhu F-T cyklů. U sad C400 a P95 byl určován relativní dynamický modul pružnosti (RDM) pomocí ultrazvukové impulzové metody a pomocí rezonan-

Tab. 2 Průměrné pevnosti v příčném tahu f_{ct} a v tahu ohybem f_{cf} na zkušebních tělesech po 0, 50 a po 100 F-T cyklech [N/mm²]

Tab. 2 Average tensile splitting f_{ct} and flexural f_{cf} strengths of the test specimens after 0, 50 and 100 F-T cycles [N/mm²]

Pevnost - sada těles	počet F-T cyklů		
	0 (REF)	50	100
f_{ct} - CS100	3,55	3,45	3,60
f_{ct} - CS150	3,20	3,25	3,25
f_{cf} - P95	5,1	4,6	4,3

Tab. 4 Směrnice kumulativních překmitů AE v průběhu zmrazovacích cyklů (za lomítkem je koeficient determinace R²)

Tab. 4 Slope of the line interpolated with cumulative AE counts during F-T cycles (the number after the slash represents the coefficient of determination R²)

Sada těles	F-T cykly			
	0-25	25-50	50-75	75-100
CS100	540 / 0,922	-	1622 / 0,998	3086 / 0,947
CS150	433 / 0,997	-	2768 / 0,999	2070 / 0,996

ční metody dle [26], [27]. U sady P95 byla také zjišťována pevnost v tahu ohybem dle [28].

Zkouška mrazuvzdornosti betonu byla prováděna podle normy [29]. Pro zkoušku bylo použito zařízení KD20, které umožňuje nastavit potřebné časové intervaly zmrazování a rozmrazování a zkouška probíhá automaticky. Jeden F-T cyklus je tvořen zmrazováním na vzduchu na teplotu -15 až -20 °C a rozmrazováním ve vodní lázni o teplotě +20 °C. Zmrazování na požadovanou teplotu trvá 0,5 h a poté je záporná teplota držena 3,5 h. Ohřívání ve vodní lázni trvá 2 h. Celkový čas jednoho F-T cyklu je tedy 6 h + přibližně 15 min (napouštění a vypouštění vody do prostoru přístroje KD20, ve kterém se nacházejí zkušební tělesa). Po každých 25 F-T cyklech, což trvá přibližně jeden týden, byla zkouška přerušena – na příslušných tělesech byl určen RDM, příp. pevnost v příčném tahu a v tahu ohybem (po 50 a 100 F-T cyklech) a také byla uložena naměřená data a znovu spuštěn záznam měření akustické emise.

Měření metodou AE bylo prováděno kontinuálně během cyklování. Na horní podstavu dvou zkušebních těles sady CS100 a dvou těles sady CS150 byl přilepen jeden snímač AE (obr. 3). Přilepení snímačů bylo po každých 25 F-T cyklech kontrolováno.

Aktivita AE byla generována vznikem poškození materiálu během F-T cyklů. Sledování aktivity AE bylo provedeno vícekanálovou jednotkou DAKEL XEDO [30] s těmito vstupními parametry: prahová hodnota pro překmity byla

200 mV, pro jednotlivé AE události pak 400 mV, vzorkování AE událostí bylo nastaveno na 4 MHz, frekvenční rozsah od 10 do 2 000 kHz. Použité snímače jsou hermeticky uzavřené a mají stupeň krytí IP68 se zvýšenou odolností proti mrazu. Snímače mají integrovaný předzesilovač a celkové zesílení bylo 65 dB. V průběhu zkoušky byly použity dva hlídací snímače, které byly umístěny na materiálech, jejichž struktura není ovlivněna F-T cykly. Tyto hlídací snímače sloužily k odfiltrování falešných signálů z okolí během post-processingu. Tímto způsobem byly získány čisté signály z jednotlivých zkušebních těles. Senzory AE byly ke vzorkům připevněny lepidlem na bázi ethylu – jedná se o pryží plněný, pružný výrobek se zvýšenou pružností a odolností proti odlupování, s odolností proti vlhkosti a teplotním rozsahem pro použití od -40 °C do +100 °C. Během experimentu nastal problém s vnitřní pamětí počítače. Přestože to vypadalo, že vše probíhá korektně a záznam se ukládá, ve skutečnosti tomu tak nebylo. Nepodařilo se bohužel zachránit data z období mezi 25. a 50. F-T cyklem – data byla nepoužitelná.

Jak již bylo uvedeno, po každém 25. F-T cyklu byl určen RDM dle vztahu:

$$RDM = \frac{X_N^2}{X_0^2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

kde RDM je relativní modul pružnosti betonu [%], X_N příslušná dynamická veličina po N provedených F-T cyklech a X_0 stejná veličina na stejném zkušebním tělese před zahájením zkoušky. Dy-

Tab. 3 Relativní vývoj sledovaných pevností (RS) a modulů pružnosti betonu (RDM) v závislosti na počtu F-T cyklů [%]

Tab. 3 Relative development of the monitored strengths and modulus of elasticity of concrete in relation to the number of F-T cycles [%]

RS/RDM - sada těles	počet F-T cyklů			
	25	50	75	100
RS(TS) - CS100	-	97,2	-	101,4
RS(TS) - CS150	-	101,6	-	101,6
RS(F) - P95	-	91,7	-	85,3
RDM(U) - P95	99,5	100,3	100,3	101,8
RDM(U) - C200	99,3	100,9	101,8	102,2
RDM(FF) - P95	98,1	97,1	97,8	98,4
RDM(FF) - C200	98,2	98,8	99,3	99,9

namickou veličinou je v tomto případě buď rychlost šíření ultrazvukového vlnění (UPV) [km/s], anebo vlastní frekvence podélného kmitání f_L [kHz]. Pro určení UPV byl použit přístroj Pundit PL-200 [31] se sondami s frekvencí 150 kHz. Každé zkušební těleso bylo změřeno ve třech podélných liniích a UPV byla určena jako průměrná hodnota těchto tří měření. Pro určení f_L byl použit osciloskop Handyscope HS4 [32].

Před zahájením zmrazování a rozmrazování, po 50. a poté po 100. F-T cyklu byla na třech zkušebních tělesech z každé sady stanovena pevnost – buď pevnost v příčném tahu (CS100 a CS150), anebo pevnost v tahu ohybem (P95). Z výsledků byla vypočtena relativní pevnost (RS) analogickým způsobem k RDM:

$$RS = \frac{f_N}{f_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

kde RS je relativní pevnost [%], f_N průměrná pevnost (v příčném tahu nebo v tahu ohybem) po N provedených F-T cyklech [N/mm²] a f_0 stejná průměrná pevnost zjištěná na třech referenčních (nezmrazovaných) tělesech [N/mm²]. Relativní pevnost v tahu ohybem RS(F) je hlavní kritérium pro hodnocení odolnosti betonu proti F-T cyklům v normě [29]. Pevnostní zkoušky probíhaly ve zkušebním lisu DELTA 6-300 [33].

Signály AE se vyhodnocují např. podle překmitů, velikosti amplitudy, frekvence atd. Nejjednodušší je počítat počty překmitů přes prahovou úroveň. Tato úroveň je nastavitelná, čímž lze řídit minimální hladinu, při jejímž překročení, tzn. překmitu, dojde k vytvarování jednoho impulsu, který čítač započítá. Jedna AE událost může vytvořit několik překmitů, jejichž počet závisí na nastá-

vení prahové úrovně [34]. Při započítání AE události je nutné vysokofrekvenční impuls události usměrnit a odfiltrovat. Počet překmitů je tzv. kumulativní parametr, z něhož jsou získány kumulativní křivky. Frekvenční i amplitudové pásmo akustické emise je rozsáhlé, od jednotek Hz po vysoké ultrazvukové frekvence v MHz [35]. Tvar pulsu a pokles amplitudy záleží na geometrii zkušební tělesa a na jeho materiálových vlastnostech, popř. na úrovni poškození materiálu. Pro určení příčiny vzniku AE události je nutno provést frekvenční analýzu spektra snímaného signálu AE. Snímače akustické emise jsou uzpůsobeny pro příjem povrchových vln, které následně převádějí na elektrické signály. Tyto signály jsou zesíleny, filtrovány a uloženy. Měřicí proces systému akustické emise začíná okamžikem, kdy hodnota zesíleného a filtrovaného analogového signálu přesáhne nastavenou prahovou úroveň.

Výsledky

Výsledky pevností v příčném tahu a tahu ohybem jsou uvedeny v tab. 2. V tab. 3 je poté uvedeno relativní vyjádření nejen pevností (RS), ale též modulů pružnosti (RDM) v závislosti na počtu provedených F-T cyklů. Mechanické vlastnosti, které jsou získány destruktivním způsobem (tedy na různých zkušebních tělesech) pouze odhadují chování betonu – rozhodně nereflektují chování jednotlivých zkušebních těles v průběhu zmrazování a rozmrazování. To může vést k nepřesným výstupům zkoušky. Z tab. 3 je vidět, že F-T cykly neměly na pevnost betonu v příčném tahu v podstatě žádný vliv. Na pevnosti v tahu ohybem se zmrazování a rozmrazování projevilo více, neboť po 100 F-T cyklech pevnost poklesla téměř

na 85 % své původní hodnoty. Tento, oproti ostatním sledovaným vlastnostem betonu, významný pokles je však částečně zapříčiněn jedním zkušebním tělesem ze tří, které vykazovalo nižší pevnost. Může se proto jednat o již zmíněnou nepřesnost v hodnocení betonu.

Relativní dynamické moduly pružnosti, jako příklad nedestruktivního zkoušení, naopak charakterizují chování zkoušených těles v průběhu zkoušky mrazuvzdornosti betonu – nikoliv však kontinuálně, pouze v diskrétních časových bodech (v okamžiku měření po N F-T cyklech). Z výsledků v tab. 3 je vidět, že F-T cykly se na betonu vzhledem k jeho dynamickému modulu pružnosti v podstatě neprojeví. Maximální zaznamenaný pokles nedosahoval ani 3 procentních bodů.

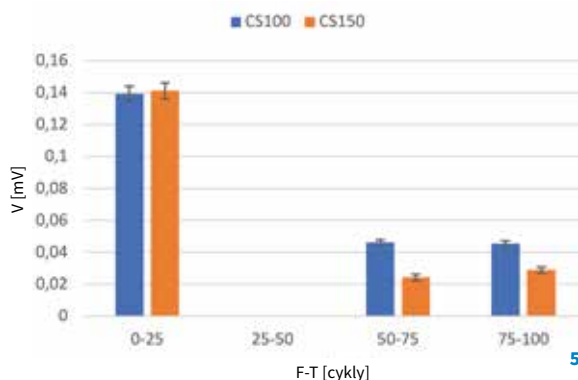
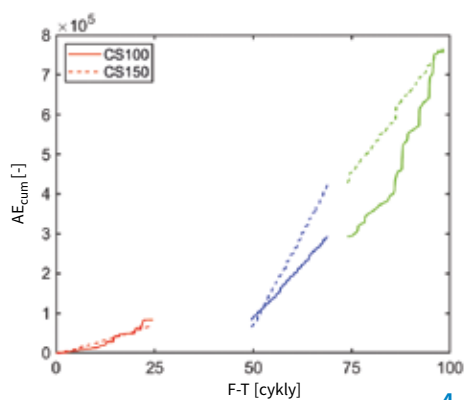
Oproti výše uvedeným testům umožňuje metoda akustické emise zachycení aktuálního stavu každého zkoušeného tělesa v průběhu celé zkoušky. Metoda AE nepřímo popisuje chování zkušebních těles v průběhu F-T cyklů. Pro vyhodnocení záznamů akustické emise byl v počátku vybrán počet překmitů (přes nastavenou prahovou úroveň) v jeho kumulativní podobě (AE_{cum}) během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů v závislosti na čase (t). Průběh kumulativního počtu překmitů v čase ukazuje aktivitu AE, přičemž vyšší aktivita AE odpovídá vyššímu poškození/porušení, jak je uvedeno např. v [36]. Graf na obr. 4 ukazuje velmi podobný charakter průběhů AE_{cum} během prvních 25 F-T cyklů u obou velikostí zkoušených těles. Ani v dalším průběhu F-T cyklů se kumulativní křivky pro jednotlivá tělesa příliš neliší. I proto byly experimentálně zjištěnými daty kumulativních překmitů proloženy přímkami. Směrnice přímek pro obě velikosti těles se během prv-

ních 25 F-T cyklů téměř neliší (tab. 4). Změna sklonů proložených přímek nastává až v průběhu 50 až 75 F-T cyklů, kdy je výrazně vyšší nárůst u větších těles CS150. Vzhledem k zachování mechanických vlastností (tab. 3) lze usuzovat na to, že se jedná o vznik malých porušení ve velkém množství (obr. 5). V poslední fázi zmrazovacích cyklů (od 75 do 100 F-T cyklů) mají naopak vyšší růst AE aktivity menší tělesa CS100, jak je vidět v tab. 4.

Z obr. 4 lze dále usuzovat, že u těles CS100 je charakter směrnice ze třetí série F-T cyklů zachován i na počátku čtvrté série F-T cyklů, tj. nad 75 F-T cyklů. Přibližně u 85. F-T cyklu se směrnice více láme k vyšší hodnotě, než je uvedeno v tab. 4 (nejmenší hodnota koeficientu determinace u 75–100 F-T cyklu).

Lze konstatovat, že obecně nejběžněji užívaný AE parametr, čímž překmit AE bezpochyby je, v tomto případě ukázal pouze zlomové okamžiky probíhajícího porušení materiálu. Bylo proto vhodné provést detailnější analýzu jednotlivých AE událostí. Důraz byl kladen na velikost amplitudy, změnu pozice dominantní frekvence a na útlum spektrální hustoty jednotlivých AE událostí.

Amplituda zachycených AE událostí vypovídá o velikosti vznikajícího poškození v materiálu. Významnější porucha struktury materiálu generuje větší hodnotu amplitudy signálu, jak je uvedeno např. v [37]. Velikost amplitudy (obr. 5) ukazuje již významnější rozdíly mezi jednotlivými velikostmi zkoušených těles. Zatímco během prvních 25 F-T cyklů jsou amplitudy v rámci chyby měření stejné, tak v následujících cyklech byla zaznamenána vyšší amplituda u těles CS100. Tento trend ukazuje na možnou větší míru poškození u těchto menších těles. Což



4 Kumulativní počet překmitů AE během zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů
5 Průměrná velikost amplitudy v průběhu F-T cyklů, chybové úsečky představují výběrovou směrodatnou odchylku
 4 Cumulative number of AE counts during F-T cycles
 5 Average amplitude height of AE hits during F-T cycles, error bars represent sample standard deviations

v podstatě odpovídá změnám směrnice z tab. 4, resp. grafu na obr. 4.

Dalším parametrem, který lze z AE událostí analyzovat, je dominantní frekvence, která je získána pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) z časového spektra, což je využito i v [38].

Z grafu na obr. 6 je patrné, jak se dominantní frekvence pro jednotlivé zaznamenané AE události posouvá směrem k nízkým hodnotám. Tento posun je způsoben tím, že mechanická vlna prochází čím dál více porušeným prostředím [39], [40]. Opět je vidět, že zatímco během prvních 25 F-T cyklů jsou dominantní frekvence na přibližně podobných hodnotách, při zvyšujícím se počtu F-T cyklů tato hodnota dominantní frekvence klesá. Pro tělesa CS100 jsou to postupně průměrné hodnoty 194, 142 a 61 kHz a pro tělesa CS150 pak 199, 162 a 72 kHz.

V následující sérii vyhodnocení jsou zastoupeny typické události AE zachycené v jednotlivých fázích F-T cyklů pro jednotlivé velikosti zkušebních těles. Časově frekvenční spektrum spektrální výkonové hustoty [41] (obr. 7 až 12) bylo počítáno pomocí Short Time Fourier Transformation s oknem typu Kaiser. Graf na vodorovné ose ukazuje časové posunutí frekvence, která je promítnuta na svislé ose. Velikost spektrální výkonové hustoty je určena barevným odstínem. Decibelová stupnice je v podstatě linearizace logaritmu, tedy:

$$\chi_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{\chi_V}{\chi_k}\right), \quad (3)$$

kde χ_{dB} je hodnota v decibelech, χ_V je hodnota (v tomto případě) ve voltech a χ_k je referenční hodnota také ve voltech.

Spektrum Short Time Fourier Transform (STFT) je definováno:

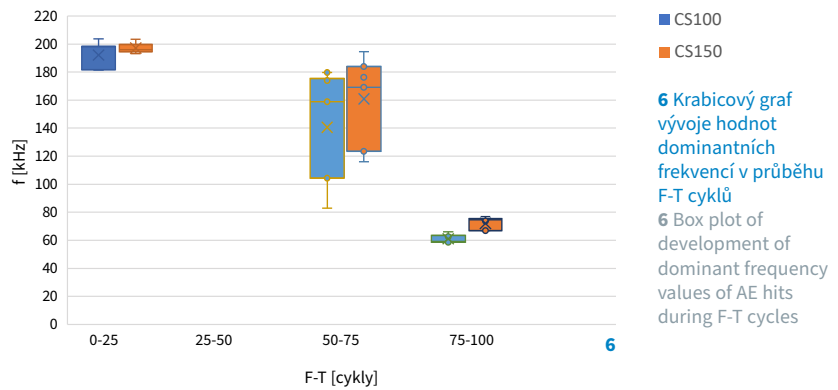
$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t)w(t-\tau)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (4)$$

kde $w(\tau)$ je funkce okna (v našem případě Kaiser), $\chi(t)$ sledovaná funkce, $S(\tau, f)$ výsledné komplexní spektrum, f frekvence a τ časové posunutí (poloha).

Pro vyhodnocení se používá absolutní hodnota spektra:

$$|S(\tau, f)| = S(\tau, f) \cdot S(\tau, f)^*, \quad (5)$$

kde $S(\tau, f)^*$ je komplexní sdružená funkce.



Vybrané typické signály AE zachycené z těles CS100 jsou zobrazeny graficky na obr. 7 až 9 (všechny uvedené grafy slouží pouze pro ilustraci a lepší pochopení pro čtenáře).

V sérii grafů na obr. 7 jsou maximální hodnoty spektra na počátku signálu (frekvenční oblast 120 až 230 kHz) relativně rychle utlumeny. Na nejvýznamnější frekvenci 201 kHz je útlum spektrální hustoty 62 dB/(Hz · ms). Nejdéle se v signálu vyskytuje frekvence 70 kHz, a to přibližně 1 ms.

V sérii grafů na obr. 8 se nacházejí významné hodnoty frekvenčního spektra ve frekvenčním rozsahu 50 až 350 kHz, avšak nejvýznamnější je oblast od 50 do 220 kHz. Signál je na těchto frekvencích velmi pomalu utlumen. Na nejvýznamnější frekvenci 184 kHz je útlum spektrální hustoty 11 dB/(Hz · ms). Tedy nejdéle znějící signály jsou ve frekvenčním rozsahu 170 až 210 kHz, a to přibližně 3 ms, a poté ve frekvenční oblasti kolem 120 kHz, a to přibližně 2,5 ms.

Z časově frekvenčního spektra (série grafů na obr. 9) vyplývají dvě významná frekvenční pásma 50 až 100 kHz (utlumená po více jak 3 ms) a 170 až 220 kHz (utlumená lehce pod 3 ms). Na nejvýznamnější frekvenci 66 kHz je útlum spektrální hustoty 4 dB/(Hz · ms).

Vybrané typické signály AE zachycené z větších těles CS150 jsou zobrazeny graficky na obr. 10 až 12 (všechny uvedené grafy opět slouží pouze pro ilustraci a lepší pochopení pro čtenáře).

Ze série grafů na obr. 10 vyplývá, že významná frekvenční oblast je 50 až 300 kHz, z níž je oblast mezi 160 až 250 kHz z hlediska amplitud extrémní. Zřetelně vyplývá, že útlum na vyšších frekvencích je větší než na frekvencích nižších. Na nejvýznamnější frekvenci 185 kHz je útlum spektrální hustoty

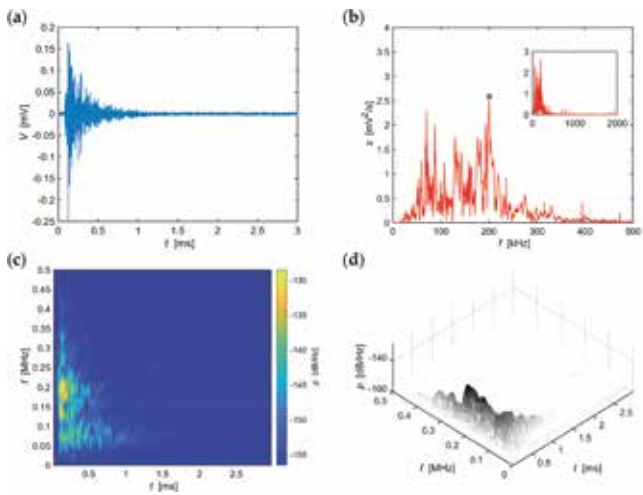
43 dB/(Hz · ms). Délka signálu je relativně krátká, přibližně do 1,5 ms.

Významné frekvenční spektrum (série grafů na obr. 11) je ve velmi úzkém pásmu 140 až 230 kHz, avšak má relativně dlouhý trvání – více než 3 ms. Na nejvýznamnější frekvenci 171 kHz je útlum spektrální hustoty 6 dB/(Hz · ms), avšak ze spektra je zřejmý rychlý útlum – přibližně 1 ms.

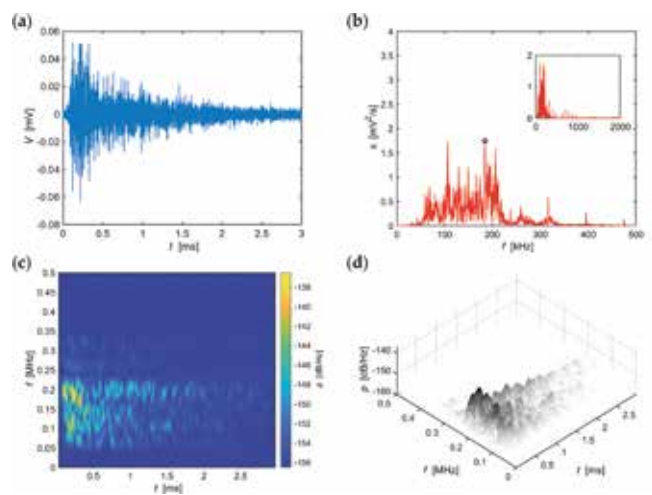
V sérii grafů na obr. 12 jsou zřetelné dva frekvenční balíky, ten významnější 50 až 120 kHz a méně významný 120 až 240 kHz. Maximální hodnota amplitud je až v čase 0,7 ms od počátku signálu. Od tohoto časového okamžiku lze určit útlum na nejvýznamnější frekvenci (75 kHz) – útlum spektrální hustoty je 6 dB/(Hz · ms).

Typické signály AE pro obě velikosti zkoušených těles v průběhu celých 100 F-T cyklů (obr. 7 až 12) potvrzují závěry, které byly učiněny na základě grafů na obr. 5 a 6. Tedy to, že amplituda se zvyšujícím se počtem zmrazovacích cyklů klesá a dominantní frekvence se posouvá směrem k nižším hodnotám.

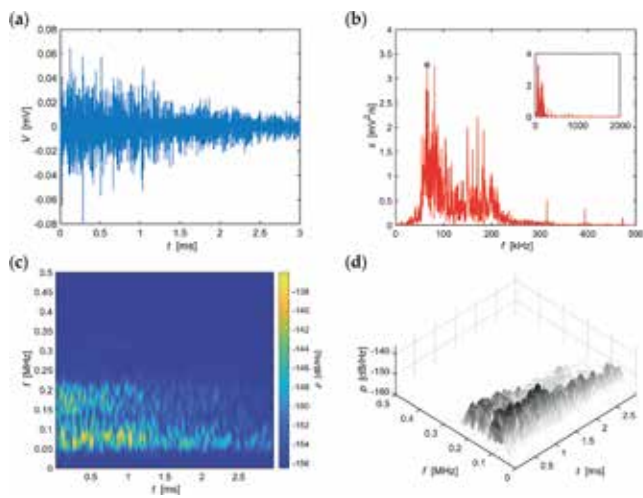
Z časově frekvenčních výkonových spekter je pak ještě vidět postupný pokles hodnot útlumu spektrální hustoty, u těles CS100 je to postupně 62, 11 a 4 dB/(Hz · ms), u těles CS150 pak 43, 6 a 6 dB/(Hz · ms). Tento pokles útlumu je pravděpodobně způsoben zvyšujícím se poškozením vnitřní struktury betonu, potažmo jeho cementové matrice, kdy porušené vazby matrice nejsou ochotny se po rozkmitání snadno a rychle utlmit. Ale tím, že jsou uvolněny, kmitají o něco déle než na počátku zkoušky mrazuvzdornosti. Taktéž dochází k poklesu frekvence a amplitudy generovaných signálů AE. Tyto všechny jevy pak způsobují zvyšující se pokles hodnot útlumu spektrální hustoty.



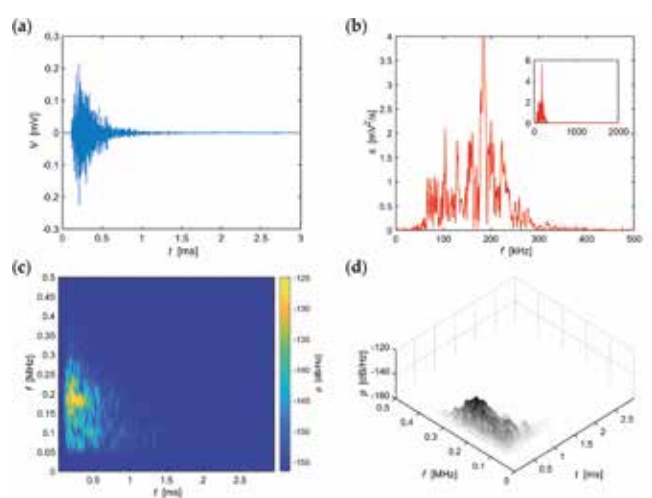
7



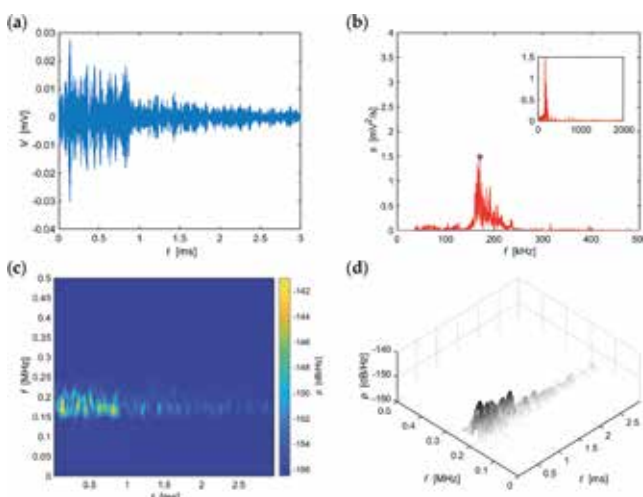
8



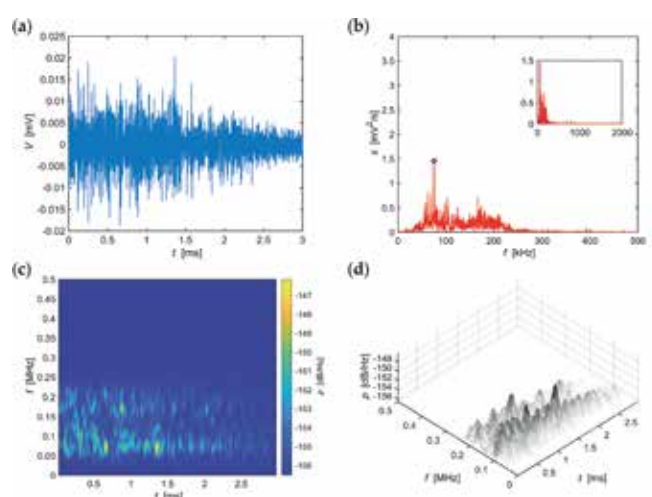
9



10



11



12

Pro obr. 7 až 12 platí: a) časový průběh amplitudy, b) frekvenční spektrum, c) spektrogram STFT – 2D zobrazení, d) spektrogram STFT – 3D zobrazení

7 Zobrazení zachyceného signálu AE během 0-25 F-T cyklu z těles CS100 **8** Zobrazení zachyceného signálu AE během 50-75 F-T cyklu z těles CS100

9 Zobrazení zachyceného signálu AE během 75-100 F-T cyklu z těles CS100 **10** Zobrazení zachyceného signálu AE během 0-25 F-T cyklu z těles CS150

11 Zobrazení zachyceného signálu AE během 50-75 F-T cyklu z těles CS150 **12** Zobrazení zachyceného signálu AE během 75-100 F-T cyklu z těles CS150

For the fig. 7 to 12: a) time course of the amplitude, b) frequency spectrum, c) spectrogram STFT – 2D image, d) spectrogram STFT – 3D image

7 Visualisation of the recorded AE signal during 0-25 F-T cycles from specimens CS100 **8** Visualisation of the recorded AE signal during 50-75 F-T cycles from specimens CS100

9 Visualisation of the recorded AE signal during 75-100 F-T cycles from specimens CS100 **10** Visualisation of the recorded AE signal during 0-25 F-T cycles from specimens CS150

11 Visualisation of the recorded AE signal during 50-75 F-T cycles from specimens CS150 **12** Visualisation of the recorded AE signal during 75-100 F-T cycles from specimens CS150

Závěr

Z výše uvedených výsledků klasických zkušebních postupů vyplývá, že nebyla zaznamenána výraznější změna v kvalitě betonu po 100 F-T cyklech. Dynamický modul pružnosti vykázal maximální pokles necelé 3 procentní body, po 100 F-T cyklech dokonce jen 1,6 procentního bodu. U pevnosti v příčném tahu také vlivem F-T cyklů nedošlo k poklesu hodnot. Jediným standardním parametrem, který vykázal určitý pokles, byla pevnost v tahu ohybem. Zde je ovšem pokles na 85,3 % původní hodnoty částečně způsoben jedním zkušebním tělesem ze tří, které vykázalo nižší pevnost.

Na základě analýzy klasických pevnostních či pružnostních parametrů se zkušební tělesa jeví jako téměř nepoškozená mrazem. Ani z klasicky uváděného kumulativního počtu překmitů AE není vidět výrazný rozdíl mezi menšími (CS100) a většími (CS150) zkušebními tělesy. Avšak při detailní analýze zachycených signálů AE, které byly vygenerovány přímo v průběhu F-T cyklů ve zkušebních tělesech, je situace odlišná:

- je vidět pokles průměrné amplitudy v průběhu zmrazovacích cyklů u obou velikostí těles,
- je patrný rozdíl mezi většími a menšími tělesy ve velikosti amplitudy po 75 a 100 F-T cyklech,
- je zřejmý posun hodnot dominantní frekvence k nižším hodnotám u obou velikostí těles,
- je patrný rozdíl mezi většími a menšími tělesy v posunu dominantní frekvence po 75 a 100 F-T cyklech,
- je vidět pokles hodnot útlumu spektrální hustoty v průběhu F-T cyklů, přičemž větší pokles byl zaznamenán u menších zkušebních těles CS100.

Ukazuje se, že i když běžné zkušební postupy neukazují výrazné strukturální změny zkoušeného betonu ani po 100 F-T cyklech, přesto se v materiálu a jeho struktuře odehrávají změny, které mohou následně vést k nevratnému poškození struktury materiálu. Proto je vhodné využívat nejen tradičních zkušebních postupů, ale i těch méně tradičních, jako je např. metoda AE, která dokáže počátek strukturálních změn betonu bezpečně odhalit.

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu GAČR č. GA19-22708S.



doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.
Fakulta stavební VUT
tomas.vymazal@vutbr.cz



prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.
Fakulta stavební VUT
pazdera.l@fce.vutbr.cz



doc. Mgr. Libor Topolář, Ph.D.
Fakulta stavební VUT
libor.topolar@vut.cz



Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Fakulta stavební VUT
dalibor.kocab@vutbr.cz

Literatura:

- [1] MARCANTONIO, V., MONARCA, D., COLANTONI, A., CECCHINI, M. Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, 120, pp. 32–42.
- [2] MASTORI, H., PILLUSO, P., HAQUET, J. F., DÉNOVEL, R., ANTONI, M. Limestone-siliceous and siliceous concretes thermal damaging at high temperature. *Construction and Building Materials*. 2019, 228(9), p. 116671.
- [3] PAZDERA, L., TOPOLAR, L. Application acoustic emission method during concrete frost resistance. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014, 50(2), pp. 127–131.
- [4] ZOU, Y. X., SHEN X. D., ZUO, X. B., XUE, H. J., LI, G. F. Experimental study on microstructure evolution of aeolian sand concrete under the coupling freeze-thaw cycles and carbonation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020.
- [5] FARNAM, Y., BENTZ, D., SAKULICH, A., FLYNN, D., WEISS, J. Measuring Freeze and Thaw Damage in Mortars Containing Deicing Salt Using a Low Temperature Longitudinal Guarded Comparative Calorimeter and Acoustic Emission (AE-LGCC). *Advances in Civil Engineering Materials*. 2014, 3(1).
- [6] SHANG, H.-S., YI, T.-H. Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete. *The Scientific World Journal*. 2013.
- [7] RILEM TC 176-IDC: *Internal Damage of Concrete due to frost action. Final Report*. RILEM Publications. SARL 2004, 37(274), pp. 740–742.
- [8] KORENSKA, M., PAZDERA, L., RITICKOVA, L. Resonant inspection – Interesting non-destructive testing tools for determine quality of tested specimens, Previous Experience and Current Innovations in Non-Destructive Testing. In: *6th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Portoroz, Slovenia*. 2001, pp. 45–48.
- [9] PLSKOVA, I., CHOBOLA, Z., MATYSIK, M. Assessment of Ceramic Tile Frost Resistance by Means of the Frequency Inspection Method. *Ceramics-Silikaty*. 2011, 55(2), pp. 176–182.
- [10] SMUTNY, J., NOHAL, V. Vibration Analysis in the Gravel Ballast by Measuring Stone Method. *Akustika*. 2016, 25, pp. 22–28.
- [11] PETRASKOVA, V. Correctness Testing and Equality Testing in Evaluation of Acoustic Laboratory Measurements. *Akustika*. 2016, 26, pp. 20–28.
- [12] ZHOU, Z. L., RUI, Y. C., ZHOU, J., DONG, L. J., CHEN, L. J., CAI, X., CHENG, R. S. A New Closed-Form Solution for Acoustic Emission Source Location in the Presence of Outliers. *Applied Sciences-Basel*. 2018, 8(6), p. 949.
- [13] TOPOLAR, L., PAZDERA, L., KUCHARCZYKOVA, B., SMUTNY, J., MIKULASEK, K. Using Acoustic Emission Methods to Monitor Cement Composites during Setting and Hardening. *Applied Sciences-Basel*. 2017, 7(5), p. 451.
- [14] FARHIDZADEH, A., DEGHAN-NIRI, E., SALAMONE, S., LUNA, B., WHITTAKER, A. Monitoring crack propagation in reinforced concrete shear walls by acoustic emission. *Journal of Structural Engineering*. 2013, 139(12), p. 04013010.
- [15] QIN, L., REN, H. W., DONG, B. Q., XING, F. Acoustic emission behavior of early age concrete monitored by embedded sensors. *Materials*. 2014, 7, pp. 6908–6918.
- [16] YUYAMA, S., LI, Z. W., ITO, Y., ARAZOE, M. Quantitative analysis of fracture process in RC column foundation by moment tensor analysis of acoustic emission. *Construction and Building materials*. 1999, 13(1-2), pp. 87–97.
- [17] RANZ, J., APARICIO, S., ROMERO, H., CASATI, M. J., MOLERO, M., GONZÁLEZ, M. Monitoring of freeze-thaw cycles in concrete using embedded sensors and ultrasonic imaging. *Sensors*. 2014, 14(2), pp. 2280–2304.
- [18] DE KOCK, T., BOONE, M. A., DE SCHRUYER, T., VAN STAPPEN, J., DERLUYN, H., MASSCHAELE, B., DE SCHUTTER, G., CNUUDE, V. A pore-scale study of fracture dynamics in rock using X-ray micro-CT under ambient freeze-thaw cycling. *Environmental Science & Technology*. 2015, 49(5), pp. 2867–2874.
- [19] LANDIS, E. N., BAILLON, L. Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002, 128(6), pp. 698–702.
- [20] FARNAM, Y., GEIKER, M. R., BENTZ, D., WEISS, J. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2015, 60, pp. 135–145.
- [21] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [22] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlítím*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [23] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [24] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [25] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [26] CEN/TR 15177. *Testing the freeze-thaw resistance of concrete – Internal structural damage*. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [27] ASTM C666 / C666M – 15. *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
- [28] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [29] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha, 1968.
- [30] Modular System DAKEL-XEDO [online]. © 2006–2022 DAKEL. Dostupné z: dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/xedo_en
- [31] PUNDIT PL-200: *Ultrasonic Pulse Velocity* [online]. © Proceq. Dostupné z: screeningagle.com/Downloads/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [32] Handyscope HS4 [online]. © TiePie engineering. Dostupné z: tiepie.com/en/usb-oscilloscope/handyscope-hs4
- [33] Bending Testing Machine DELTA6-300 [online]. © 2004–2021 FORM+TEST GmbH. Dostupné z: formtest.de/en/Products/Machines/DELTA-6-300.php
- [34] NAZARCHUK, Z., SKALSKI, V., SERHIYENKO, O. *Acoustic Emission: Methodology and Application. Foundations of Engineering Mechanics*. Springer, 2017.
- [35] ČSN EN 13554. *Nedestruktivní zkoušení – Akustická emise – Všeobecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [36] KAHIRDEH, A., SAUERBRUNN, C., MODARRES, M. Acoustic emission entropy as a measure of damage in materials. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. July 2016, 1757 (1), p. 060007.
- [37] NAIR, A., CAI, C. S. Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. *Engineering Structures*. 2010, 32(6), pp. 1704–1714.
- [38] AHMAD, A., SCHLINDWEIN, F. S., NG, G. A. Comparison of computation time for estimation of dominant frequency of atrial electrograms: Fast fourier transform, blackman tukey, autoregressive and multiple signal classification. *Journal of Biomedical Science and Engineering*. 2010, 3(9), p. 843.
- [39] BALAYSSAC, J. P., GARNIER, V. (Eds.). *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. Elsevier, 2017.
- [40] MATYSIK, M., PLSKOVA, I., CHOBOLA, Z. Estimation of Impact-echo Method for the Assessment of Long-term Frost Resistance of Ceramic Tiles. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd. 2014, 1000, pp. 285–288.
- [41] ADAMCZAK-BUGNO, A., SWIT, G., KRAMPKOWSKA, A. Assessment of destruction processes in fibre-cement composites using the acoustic emission method and wavelet analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing Ltd. 2019, 471, pp. 1–9.