

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 213

ISSN 1213-418X

Marta Kořenská

APLIKACE AKUSTICKÝCH METOD VE STAVEBNICTVÍ

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav fyziky

Ing. Marta Kořenská, CSc.

APLIKACE AKUSTICKÝCH METOD VE STAVEBNICTVÍ

APPLICATION OF ACOUSTIC METHODS IN CIVIL ENGINEERING

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2006

KLÍČOVÁ SLOVA:

akustické metody, akustická emise, impact-echo metoda, nelineární akustická spektroskopie, struktura, trhлина, porucha, železobetonové konstrukce, pálená střešní krytina, stropní desky Hurdis, keramické dlaždice

KEY WORDS:

acoustic methods, acoustic emission, impact-echo method, nonlinear acoustic spectroscopy, structure, crack, defect, reinforced concrete constructions, burnt roof tiles, floor slabs Hurdis, ceramic tiles

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE:

Originál habilitační práce je uložen v archivu Oddělení pro vědu a výzkum FAST VUT v Brně.

© Marta Kořenská 2006

ISBN 80-214-3276-4

ISSN 1213-418X

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 AKUSTICKÁ EMISE.....	6
2.1 Fyzikální jev a měřicí metoda.....	6
2.2 Zpracování signálu akustické emise	6
2.3 Aplikace metody akustické emise.....	7
2.3.1 Předpjaté pražce	7
2.3.2 Měření mostních konstrukcí.....	10
2.3.3 Diskuse výsledků	13
3 IMPULS - ECHO METODY	13
3.1 METODA IMPACT-ECHO	14
3.1.1 Metoda analýzy signálu	14
3.2 Experimentální část.....	14
3.2.1 Měření akustických vlastností pálené krytiny	15
3.2.2 Diagnostika stropních desek Hurdis	18
3.2.3 Diagnostika koroze ocelové výztuže.....	19
4 NELINEÁRNÍ AKUSTICKÁ SPEKTROSKOPIE.....	21
4.1 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPICKÉ METODY	21
4.2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	23
4.2.1 Měřicí zařízení	24
4.2.2 Testování keramických dlaždic	24
5 ZÁVĚR.....	26
6 POUŽITÁ LITERATURA (VÝBĚR)	27
ABSTRACT.....	29



Ing. Marta Kořenská, CSc. (* 1943, Žatčany)

Autorka je absolventkou Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, obor Pozemní stavby (1974). Je kandidátkou Fyzikálně-matematických věd v oboru 11-22-9 Fyzika kondenzovaných látek a akustika. Kandidátskou disertační práci na téma Akustická emise v pevných látkách obhájila na Fakultě stavební v roce 1989.

Před působením na Vysokém učení technickém v Brně byla zaměstnána ve Výzkumném a vývojovém oddělení n. p. Prefa Brno, kde byla její činnost zaměřena na konstrukce zařízení pro kontrolu a řízení technologických postupů při výrobě prefabrikátů (1961-1967). Na Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně je zaměstnána od roku 1967, zpočátku jako výzkumný pracovník a následně jako pracovník pedagogický.

V oblasti pedagogické se podílí na výuce předmětu teoretická a laboratorní cvičení v základním kurzu fyziky. Vede výuku a je garantem předmětu Fyzika I pro kombinované studium. Dále je školitelkou studentů doktorského studia v oboru 36-33-9 Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, v současné době školí tři doktorandy. Témata jejich doktorských prací jsou zaměřena na studium a výzkum nedestruktivních metod pro diagnostiku ve stavebnictví. Řešení jednoho z témat bylo v roce 2005 podpořeno projektem Fondu rozvoje vysokých škol.

Její vědeckovýzkumná činnost je zaměřena na defektoskopii stavebních materiálů a konstrukcí. V oblasti nedestruktivního testování se zabývá akustickými metodami. Od roku 1975 je zapojena do výzkumu akustické emise. V rámci disertační práce se zabývala studiem fyzikální podstaty jevu akustické emise a teorií metod zpracování akustických signálů, sestavením měřicího zařízení a aplikacemi metody v oblasti stavebnictví. V posledních letech se autorka zaměřila na výzkum akustických metod z hlediska možnosti jejich využití pro diagnostiku koroze ocelové výztuže v železovém betonu. V současné době se věnuje zejména studiu a výzkumu nových metod nelineární akustické spektroskopie. Vývoj těchto metod, potřebné vyhodnocovací techniky a především jejich aplikace v praxi jsou v počátečním stádiu, avšak dosavadní poznatky ukazují velkou perspektivu těchto metod pro defektoskopii a zkoušení materiálů v nejbližší budoucnosti. Na řešení uvedené problematiky byl autorce přidělen projekt GA ČR.

Výsledky své vědeckovýzkumné činnosti průběžně prezentuje na zahraničních i domácích konferencích. Je autorkou/spoluautorkou 5 článků v zahraničních časopisech, 7 článků v domácích časopisech, 13 příspěvků na světových/evropských konferencích a 102 příspěvků na mezinárodních/národních konferencích. Byla jmenována do výzkumné rady školitelů Amerického biografického institutu v Raleighu. Spolupracovala na řešení 4 Státních výzkumných úkolů, 11 projektů GA ČR a 15 projektů pro výrobní praxi. V roce 2005 byla spoluřešitelkou projektu FRVŠ a od roku 2006 je odpovědnou řešitelkou projektu GA ČR.

Je členkou výboru České společnosti pro nedestruktivní testování, předsedkyní regionální skupiny Jižní Morava a členkou redakční rady odborného časopisu pro stavebnictví a strojírenství Konstrukce.

1 ÚVOD

Trvanlivost stavebních materiálů a životnost stavebních konstrukcí je funkcí mnoha faktorů, z nichž nejdůležitější jsou: kvalita projektu, kvalita použitých stavebních materiálů, kvalita stavebních prací a zejména podmínky užívání včetně údržby stavebního objektu. Jedním ze zdrojů poruch stavebních konstrukcí jsou nesprávně předpokládané podmínky exploatace stavebního díla v průběhu jeho životnosti a možné změny užitelských podmínek stavby. Pro hodnocení skutečného stavu staveb jsou hledány nedestruktivní metody, které by dokázaly identifikovat vady stavebních konstrukcí již v raném stadiu a umožnily tak jejich včasné odstranění a minimalizovat tím jejich důsledky.

Během posledních deseti let se stala aktuální problematika stavu betonových a železobetonových objektů, jejichž bouřlivý rozvoj nastal v minulém století. Vyztužené betonové konstrukce jsou ve své trvanlivosti ovlivňovány vlivy koroze výztuže, neboť ta snižuje soudržnost, nepříznivě působí na okolní beton a oslabuje vlastní průřez výztuže. Havárie mostních konstrukcí v důsledku zkorodované výztuže v zahraničí se staly impulsem pro výzkum NDT metod, které by dokázaly diagnostikovat stupeň korozního napadení výztuže.

Dalším aktuálním problémem jsou havárie stropních konstrukcí z desek HURDIS, ke kterým dochází od počátku devadesátých let. Při produkci těchto desek v cihelnách ČR, v počtu pět až šest milionů kusů ročně, bylo pravděpodobně postaveno přes sto tisíc stavebních objektů s těmito stropy. Do roku 2001 se projevovaly zhruba tři havárie stropních konstrukcí s deskami HURDIS ročně, avšak v posledních letech se četnost poruch výrazně zvýšila a lze očekávat, že poruchy budou pokračovat i v dalších letech. Pro možnost prozkoumání a posouzení statické spolehlivosti ohrožených stropních konstrukcí jsou rovněž intenzivně hledány vhodné nedestruktivní metody.

Nedoceňovanou oblastí použití nedestruktivních metod zkoušení je jejich využití jako nástroje při hodnocení stavebních materiálů a výrobků v rámci mezioperační kontroly prováděné výrobcem. Vzhledem k tomu, že výrobci obvykle nedisponují svými zkušebnami, mezioperační kontrola se omezuje pouze na sledování vzhledu, rozměru výrobků, případně hmotnosti. Pevnostní charakteristiky jsou zjišťovány v omezeném rozsahu – při kontrolních zkouškách v externích zkušebnách. V této souvislosti je třeba neopomenout skutečnost, že do výše uvedených stropních konstrukcí mohou být začleněny, v důsledku nedostatečné kontroly výrobce a nedostatečného dozoru stavby, i desky HURDIS, které obsahují trhliny už před jejich použitím [21]. Zvýšení úrovně výstupní kontroly kvality výrobků lze dosáhnout jejich tříděním pomocí vhodné nedestruktivní metody.

V oblasti nedestruktivního testování se v posledních letech významně rozvíjí nejen přístrojová technika, ale i využívané zkušební postupy, takže se v řadě případů významně zvyšují možnosti detekce vad a jejich charakterizování. Výzkum v této oblasti je však velmi časově i finančně náročný (musí být použit větší počet vzorků s přirozenými vadami vhodného typu a velikosti) a proto je pouze málo pracovišť, která se této problematice věnují.

Cílem práce bylo vytvořit předpoklady využití vybraných akustických metod pro diagnostiku stavebních prvků a konstrukcí. Konkrétně se jedná o metodu akustické emise, impact-echo metodu a nelineární akustickou spektroskopii.

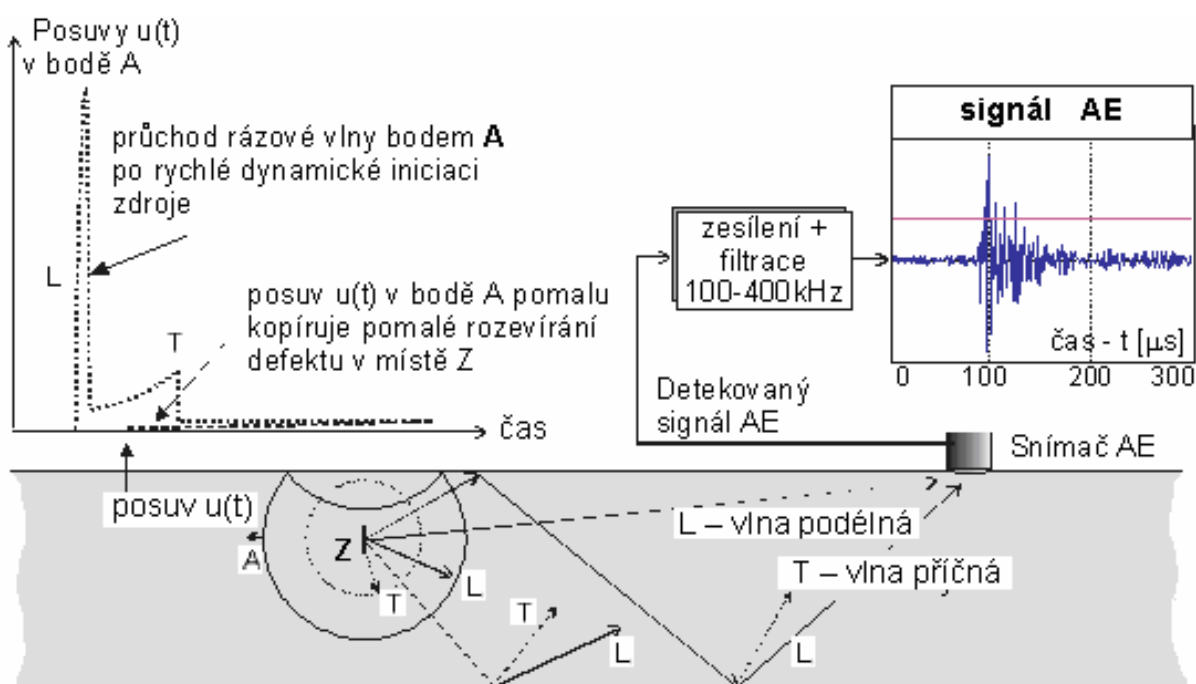
2 AKUSTICKÁ EMISE

Akustická emise je jednou z nedestruktivních metod s možností aplikace v široké oblasti materiálů, protože umožňuje detekovat rozvoj a stupeň poškození vnitřní struktury konstrukcí. Jedná se zejména o odezvu materiálu na vnější mechanické zatížení, změny teploty a pod.

2.1 FYZIKÁLNÍ JEV A MĚŘICÍ METODA

Jevem akustické emise (AE) fyzikálně rozumíme proces vzniku a šíření mechanických (akustických) vln uvolněných při lokální dynamické přestavbě vnitřní struktury látky.

Překročením mezní pevnosti struktury látky se impulsně uvolňuje akumulovaná potenciální energie převážně formou tepelného a akustického vyzařování. Vzniká tak primární zdroj akustické emise vyzařující energii, obr.1. Ze zdroje akustické emise (Z) se šíří počáteční kulové vlnoplochy podélné L a příčné T vlny, které se následně v tělese šíří, odrážejí a rozpadají – vytvářejí výslednou odezvu zdroje detekovanou v místě snímače AE. Tyto signály se zpracovávají odpovídajícím přístrojovým vybavením pro detekci, charakterizaci a lokalizaci zdrojů AE.



Obr. 1 Princip jevu a citlivosti detekce akustické emise

Příčinu vzniku emisního zdroje je možné určit z chování tohoto zdroje v průběhu zvyšování a snižování zatížení a dále podle charakteru emisních událostí pocházejících z tohoto zdroje. Hlavními znaky emisního zdroje způsobeného vznikající trhlinou jsou např. Kaiserův efekt, aktivní charakter emise a vysoká intenzita emise. Kaiserovým efektem je nazýván jev, kdy je emisní zdroj aktivní pouze při zvyšování zatížení nad mez, které již bylo dříve dosaženo. Dalším ukazatelem je Felicity jev, který je definován jako vznik výrazné akustické emise při nižší úrovni zatížení než bylo předchozí maximum. Tento jev byl sledován především u kompozitních materiálů.

2.2 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE

V současné době existuje několik standardních postupů pro zpracování a vyhodnocování signálů akustické emise. Mezi nejstarší a nejpoužívanější postupy patří počítání překmitů (counts) přes dané prahové úrovně a sledování vývoje tohoto počtu v čase. Na tento způsob úzce navazuje

počítání tzv. událostí (events), které rozlišuje jednotlivé emisní události od sebe pomocí nastavených parametrů, jako jsou prahová úroveň, délka trvání události a mrtvý čas mezi dvěma po sobě následujícími událostmi. Pro globální popis bývá doplňkem těchto měřených veličin měření RMS hodnoty signálu, případně energie signálu. K podrobnému popisu jednotlivých emisních událostí bývají používány tzv. obálkové parametry. Mezi tyto obálkové parametry patří měření doby náběhu, maximální amplitudy události, délky trvání události, počty překmitů v rámci události atd. Pro určení příčiny vzniku emisní události je prováděna frekvenční analýza spektra snímaného signálu AE, zpravidla Fourierovou transformací:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (1)$$

kteřá rozkládá signál $x(t)$ do množství sinusových vln různých frekvencí. Převádí zkoumání signálu z oblasti časové do oblasti frekvenční. Pro výpočet je nejčastěji používán algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT).

2.3 APLIKACE METODY AKUSTICKÉ EMISE

Studovány byly možnosti využití metody AE pro diagnostiku stavu ocelové výztuže z hlediska korozního napadení a jeho důsledků na strukturu železobetonových konstrukcí.






2.3.1 Předpjaté pražce

Testováno bylo 8 kusů železničních pražců typu B-91S o délce 2,6 m, s deseti pruty výztuže o průměru 6 mm. Pět kusů obsahovalo různý počet zkorodovaných prutů výztuže, u zbývajících třech kusů byla výztuž korozi nedotčena a tyto pražce byly využity jako referenční vzorky [11]. Rozmístění zkorodované výztuže v jednotlivých pražcích je patrné z tab. 1.

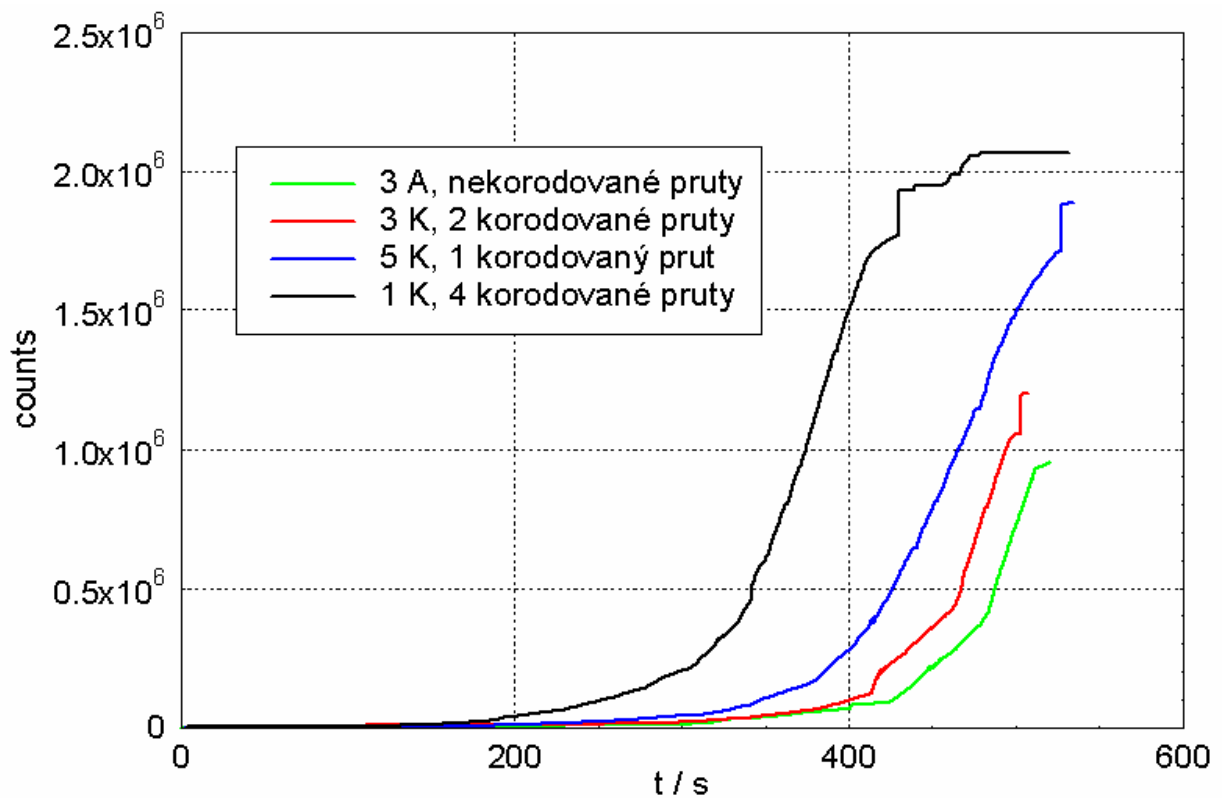
Zatěžování pražců (po 2 měsících zrání) bylo realizováno v lisu pro stanovení statické únosnosti (tah za ohybu). Snímače byly umístěny v jedné přímce v polovině rozpětí pražce, úroveň přímky vyznačuje šipka, tab. 1. Signály akustické emise byly zaznamenávány v průběhu celého zatěžování, do vzniku první viditelné trhliny. Záznam a vyhodnocení signálů bylo realizováno pomocí systému pro analýzu akustické emise LOCAN 320 - čtyři snímače a dva snímače byly využity pro záznam časových realizací k provedení frekvenční analýzy.

Výsledky měření

V tabulce 1 je uveden přehled hodnot parametrů sledovaných v průběhu měření. Jsou to časové okamžiky identifikace vzniku první trhliny včetně odpovídající hodnoty zatěžovací síly a analogicky i konec zatěžování se současným ukončením záznamu signálů akustické emise pro jednotlivé pražce. Na obr. 2 jsou porovnávány výsledky měření pražců 3A, 1K, 3K, 5K, během jejichž zatěžování byl nárůst síly i její maximální hodnoty srovnatelné. Zobrazené křivky odpovídají časovým závislostem počtu překmitů (counts) zaznamenaných v průběhu zatěžování všemi čtyřmi snímači. Je patrné, že nejvyššího počtu signálů bylo dosaženo při měření pražce 1K, na němž byly snímače umístěny nejbliže ke zkorodovaným prutům. Druhý nejvyšší počet překmitů byl zaznamenán při měření pražce 5K, ve stejné vzdálenosti od snímačů se nacházel jeden zkorodovaný prut. Jako další následuje pražec 3K se zkorodovanou vnitřní výztuží a nejnižší počet překmitů byl zaznamenán v případě pražce 3A, s výztuží korozi nedotčenou. Srovnatelný exponenciální nárůst kumulativních křivek vykazují dvojice pražců 1K a 5K, které se vzájemně lišily počtem zkorodovaných prutů výztuže. V případě druhé dvojice pražců, 3K - zkorodované vnitřní pruty a 3A - výztuž bez koroze, lze průběh kumulativních křivek rozdělit na tři lineární úseky. Obdobných výsledků bylo dosaženo i v případě vyhodnocení časové závislosti doby trvání a velikosti amplitud jednotlivých překmitů.

Pražce		1. trhlina		Konec zatěžování	
Číslo	Rozmístění zkorodované výztuže	t / s	F / kN	t / s	F / kN
1 K		393	125	422	127
2 K		344	142	405	145
3 K		475	127	498	132
4 K		503	126,5	527	130
5 K		450	122	526	129
2 A	bez koroze	553	129	646	142
3 A	bez koroze	483	118	511	126

Tab. 1 Časový průběh zatěžování



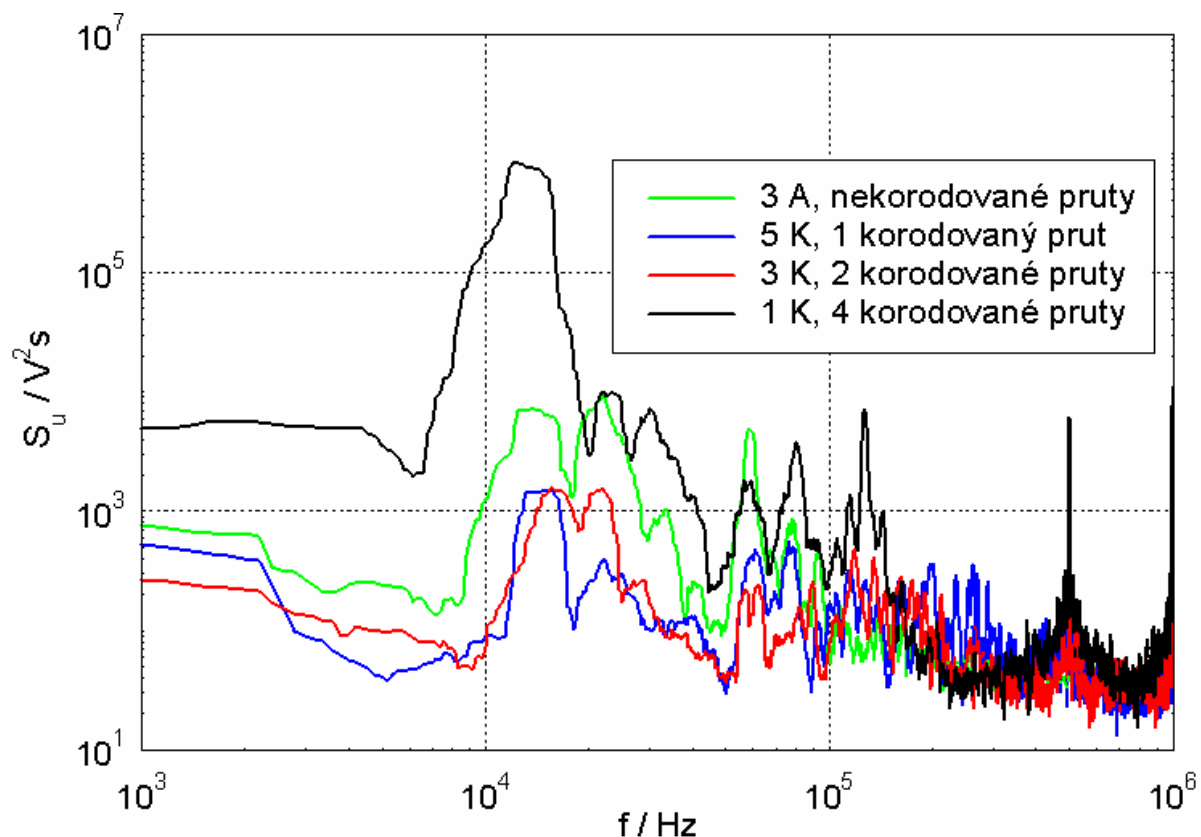
Obr. 2 Časová závislost četnosti překmitů

Frekvenční spektra na obr. 3 odpovídají signálům akustické emise zaznamenaným při srovnatelných hodnotách zatěžovací síly (≈ 120 kN). V případě prazců se zkorodovanou výztuží (1K, 3K, 5K) je patrný vyšší počet frekvenčních složek v rozsahu 60 až 400 kHz, hodnoty zvýrazněných frekvencí odpovídají důsledkům zkorodované výztuže.

Frekvenční složky charakterizující postupující korozi výztuže v železobetonu [8]:

- při narušení oxidových vrstev na povrchu kovu vznikají signály AE, o maximální frekvenci okolo 275 kHz
- u signálů vznikajících plastickou deformací betonu při tlaku korozní vrstvy, která zvětšuje svůj objem, jsou pozorovány frekvence okolo 300 kHz
- impulsy vznikající v důsledku narušené struktury korozní vrstvy obsahují frekvence v oblasti 225-250 kHz
- při porušení betonu jsou registrovány impulsy AE s maximální frekvencí blízkou 60 kHz
- signály vznikající odštěpováním pojiva, spojitý vznik mikrotrhlin a lokální oddělení výztuže od betonu generují signály se střední frekvencí okolo 120 a 150 kHz
- signály doprovázející vznik mikrotrhlin vykazují frekvence okolo 350 kHz.

V případě prazce 3A (nekorodovaná výztuž) nejsou uvedené frekvenční složky ve frekvenčním spektru zvýrazněny.



Obr. 3 Frekvenční spektra AE signálů

Diskuze výsledků

Výsledky laboratorních zkoušek prokázaly, že při zatěžování vzorků, nosníků a těles v lise nebo obdobných zařízeních, poskytuje dostatečné informace analýza parametrů AE získaných z časového průběhu sejmutého signálu. Jejich porovnáním s parametry získanými při měření referenčních vzorků lze diagnostikovat korozi výztuže. Pro určení příčiny vzniku emisní události je nutno provést frekvenční analýzu spektra snímaného signálu AE. Nalezená korelace mezi

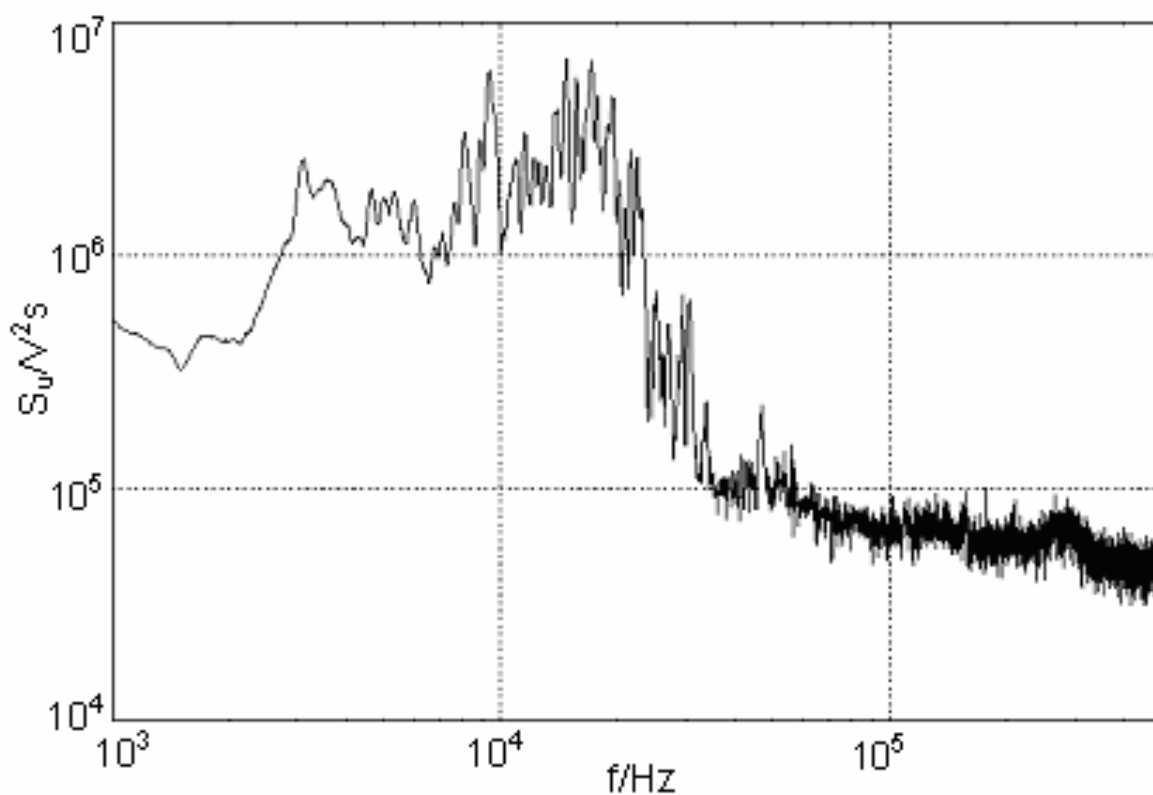
frekvenčními složkami a stupněm korozního napadení výztuže byla využita pro stanovení metodiky pro měření in situ.

2.3.2 Měření mostních konstrukcí

Měření byla realizována na mostních konstrukcích určených k demolici, což umožnilo verifikaci výsledků měření se skutečným stavem výztuže. Dostatečně vysoká hodnota budící síly, vyvolaná přejezdem naloženého nákladního vozidla přes dřevěný práh, byla zdrojem vzniku iniciace trhlin, které generovaly AE v mostní konstrukci [10].

Most Klucké Chvalovice

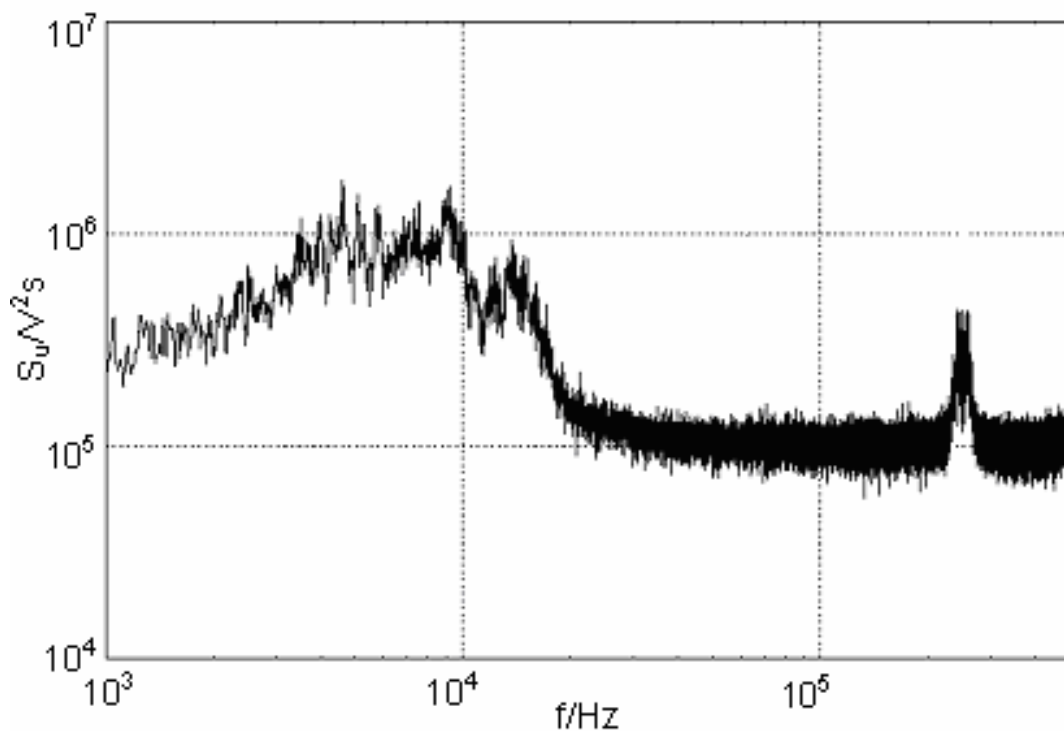
Jednalo o vetknutý trámový most. Signály AE byly snímány v polovině rozpětí mostu na všech čtyřech trámech a na desce mostovky (mezi vnitřními trámy). Zaznamenané signály byly analyzovány pomocí FFT.



Obr. 4 Frekvenční spektra signálů AE, trám 2 a 3

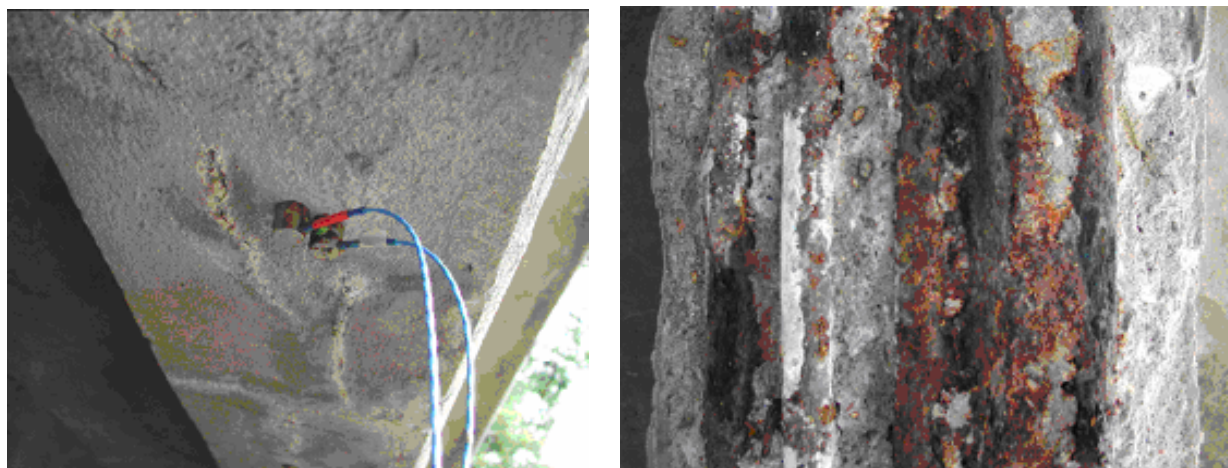
Frekvenční spektra odpovídající signálům sejmutým na vnitřních trámech 2 a 3 vykazovala téměř shodné průběhy, obr. 4. Zvýšené hodnoty byly patrné v oblasti nižších frekvencí do 30 kHz, které jsou zřejmě vyvolány odezvou (průhybem) mostu na dopad náprav nákladního vozidla. Další výraznější hodnoty na frekvenčních složkách 50 a 60 kHz zřejmě odpovídají trhlinám v betonu a nepatrně zvýšená hodnota v okolí frekvence 250 kHz odpovídající narušené struktuře korozní vrstvy [8].

Graf na obr. 5 analogicky odpovídá vnějším trámům 1 a 4. Obě frekvenční spektra mají rovněž shodný průběh, v tomto případě s výrazným uplatněním frekvenční složky 250 kHz.



Obr. 5 Frekvenční spektra signálů AE, trám 1 a 4

Hlavní nosná výztuž trámů byla tvořena pěti hladkými pruty o průměru 25 mm. Nebyla zde zjištěna žádná smyková výztuž (třmínky). Na obr. 6 je zobrazen povrch trámu 1 při měření a stav nosné výztuže po odstranění krycí vrstvy betonu. Zjištěné korozní napadení výztuže je shrnuto v tab. 2.



Obr. 6 Trám 1 – povrch, stav výztuže

Korozní poškození	trám 1	trám 2	trám 3	trám 4
hloubka poškození 2–4 mm	5%	-	-	2%
šupiny rzi 2 mm	35%	40%	65%	15%
šupiny rzi 1 mm	45%	15%	20%	25%

Tab. .2 Zjištěný stav korozního poškození výztuže

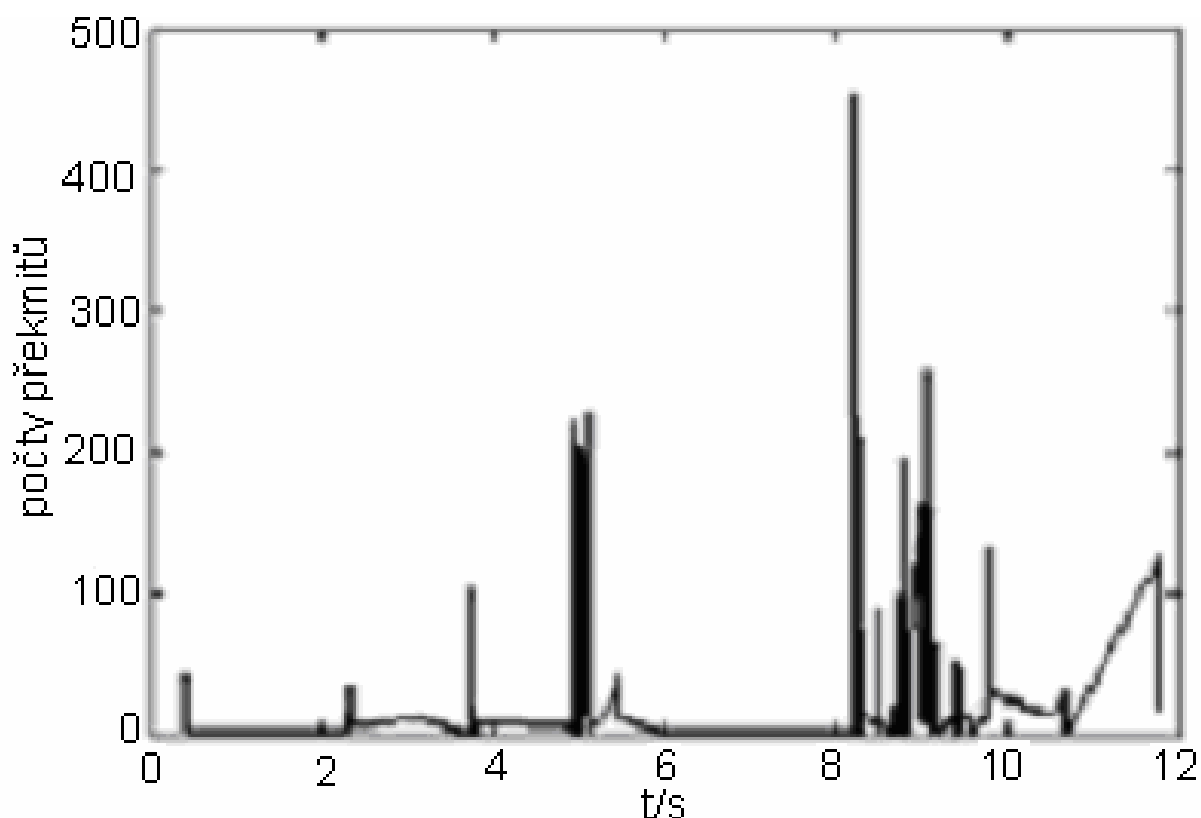
Diskuze výsledků

Oblast nižších frekvencí do 30 kHz je zřejmě ovlivněna odezvou (průhybem) mostní konstrukce na dopad náprav zatěžovacího vozidla a se stavem vnitřní struktury souvisí vyšší frekvenční složky. Frekvence 50 a 60 kHz, charakteristické pro trhliny v betonu, se vyskytovaly ve frekvenčních spektrech odezvy vnitřních trámů, trhliny jsou patrné v blízkosti snímačů na obr. 6. Frekvenční složka 250 kHz odpovídající narušení struktury korozní vrstvy byla výrazně zastoupena u krajních trámů 1 a 4, jejichž výztuž byla nejvíce napadena korozí; úbytky v místě měření a jeho blízkém okolí činily 4 mm.

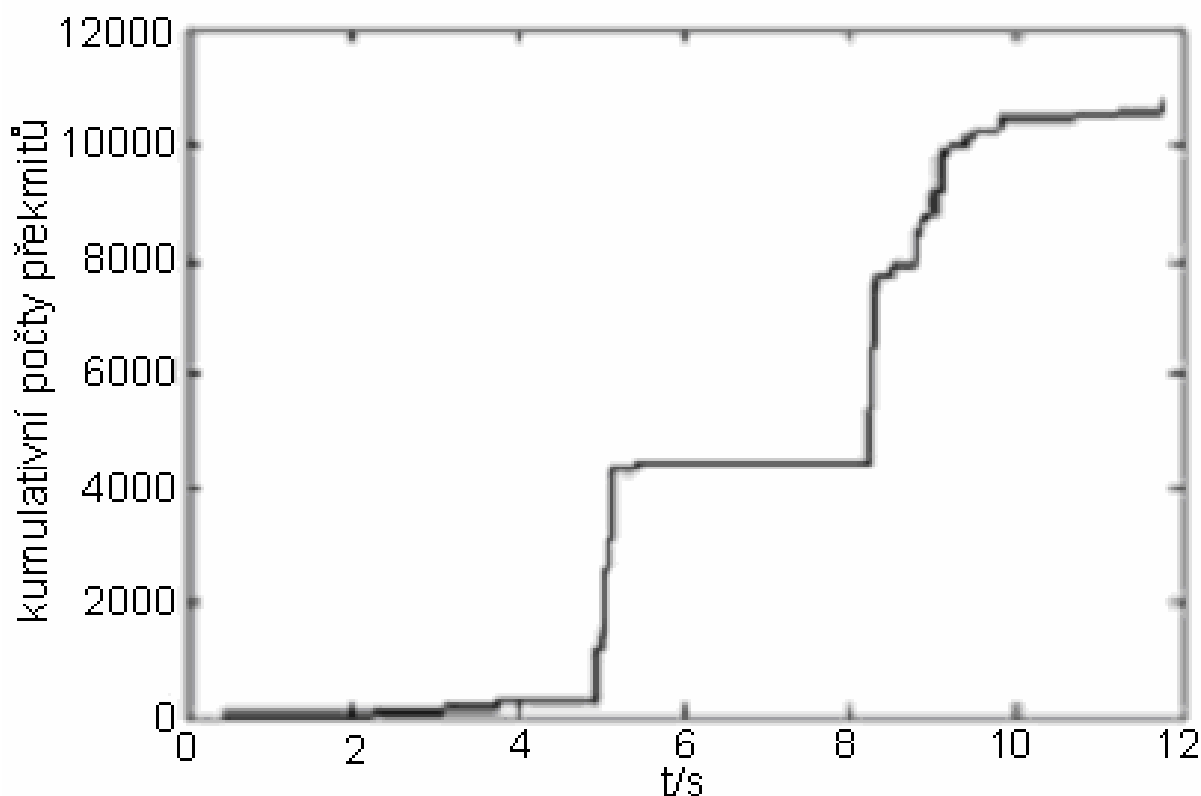
Most Vícemilice

V tomto případě se jednalo o monolitický trámový most, uložený na ocelových ložiscích. Most byl proměřován v polovině rozpětí postupně na všech trámech, rozmístění snímačů bylo souměrné vzhledem k podélné i příčné ose trámu. Pomocí analyzátoru akustické emise (LOCAN 320 - čtyři snímače) byly analyzovány časové záznamy odezvy..

Na obr. 7 je zobrazena časová závislost počtu překmitů zaznamenaných všemi čtyřmi snímači. Je zde patrná koncentrace překmitů ve dvou časových intervalech, 4 až 6 s a 8 až 12 s. Tyto časové intervaly odpovídají působení impulsní síly vyvolané dopadem první a druhé nápravy zatěžovacího vozidla na vozovku. Souhrnná kumulativní křivka (obr. 8) nevykazuje typický exponenciální nárůst překmitů, rovněž je na ní patrná prodleva v zatěžování.



Obr. 7 Časový průběh počtu překmitů ze všech čtyř snímačů



Obr. 8 Časový průběh kumulativního počtu překmitů ze všech čtyř snímačů

Frekvenční spektrum signálů AE v případě této mostní konstrukce obsahovalo vyšší počet frekvenčních složek v rozsahu 100 - 400 kHz, generovaných zřejmě třením mezi pohyblivými částmi mostní konstrukce.

2.3.3 Diskuse výsledků

Při testování mostů byly zaznamenávány aktivity signálů AE na jednotlivých prvcích mostní konstrukce a následně byla vyhodnocena frekvenční spektra pulsů AE. Průměrné frekvence pulsů korespondovaly s hodnotami frekvencí dle [8], z čehož vyplývá, že původcem signálů může být koroze výztuže a praskání betonu z důvodu postupného nashromáždění korozních produktů. Frekvenční složky generované třením, v případě narušeného povrchu pohyblivých částí mostní konstrukce, měly obdobný průběh jako signály akustické emise při šíření trhlin podél zkorodované výztuže.

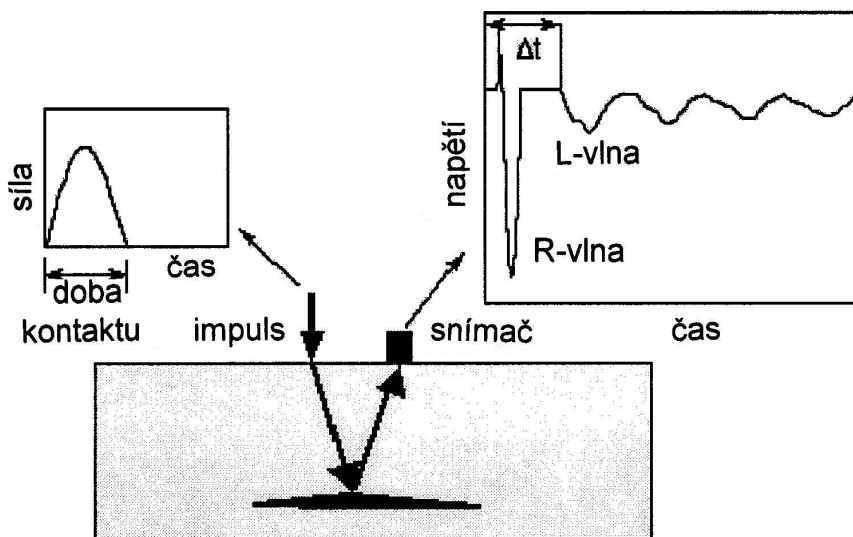
Z výše uvedených faktů vyplývá, že pro určení stavu ocelové výztuže, respektive stupně koroze ocelové výztuže, je nutné sledovat danou konstrukci v delším časovém intervalu za účelem získání řady frekvenčních spekter. Tato spektra postihnou vyvíjející se korozní proces a jeho důsledky obdobně, jak prokázalo monitorování laboratorně připravených vzorků.

3 IMPULS - ECHO METODY

Princip těchto metod spočívá v realizaci napěťového přechodového impulsu na povrchu testovaného objektu a sledování jeho šíření objektem. V oblasti stavebnictví v současné době nachází nejširší uplatnění metoda impact-echo, při které je jako zdroj budícího impulsu používán mechanický impuls.

3.1 METODA IMPACT-ECHO

Metoda je založena na šíření napěťových vln generovaných mechanickým impulsem. Základy této metody byly vyvinuty v roce 1983 [12]. Studie prokázaly, že impact-echo metoda je vhodná k rychlé detekci, lokalizaci a hodnocení nespojitostí uvnitř betonu, detekci dutin, trhlin a měření tloušťky betonových prvků. Přechodový napěťový impuls přivedený na povrch se šíří testovaným objektem kulovými vlnoplochami jako podélné a příčné vlny, které jsou odraženy vnitřními nespojitostmi, respektive vnějšími stěnami. Snímač umístěný v blízkosti budícího impulsu zaznamená příchod povrchové R-vlny a odražené podélné L-vlny, obr. 9 [24].



Obr. 9 Princip impact-echo metody

Známe-li rychlost podélných vln c_L v testovaném objektu, potom můžeme z časového posunu Δt , mezi budícím pulsem a příchodem první odražené podélné vlny stanovit vzdálenost povrchu d , na kterém se odrazila podélná vlna.

3.1.1 Metoda analýzy signálu

Prvá vyhodnocení byla prováděna interpretací časových realizací, avšak častější způsob vyhodnocení je frekvenční analýza časové realizace. Mechanický impuls vybudí ve vzorku mechanické vlnění na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických frekvencích, které však závisí především na rozměrech a materiálových vlastnostech komponent. Pokud jsou materiálové vlastnosti testovaných výrobků jiné než srovnávacího etalonu (tj. jiná tuhost, jiný obsah příměsí atd.) potom jsou také tyto frekvence posunuty ve srovnání s etalonem. Jedná se o porovnávací metodu, která předpokládá znalost frekvenčních spekter „dobrých“ výrobků (etalonů) a jejich porovnání se spektrem testovaného výrobku. Pokud jsou patrné rozdíly ve vlastních frekvencích, je třeba soustředit pozornost na tyto frekvence, analyzovat rozdíly mezi „dobrým“ a „vadným“ výrobkem. Impact-echo testy je tedy jednodušší a rychlejší vyhodnocovat ve frekvenční doméně. Transformace z časové do frekvenční oblasti jsou zpravidla realizovány pomocí Fourierovy transformace.

3.2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pomocí impact-echo metody byla testována pálená střešní krytina po tepelném zatěžování s cílem využít výsledky pro posouzení mrazuvzdornosti. Dále to byly keramické stropní desky HURDIS, sledován byl zejména vliv vlhkostních změn na strukturu stropní desky a monitorována byla postupující koroze ocelové výztuže v atypických železobetonových vzorcích.

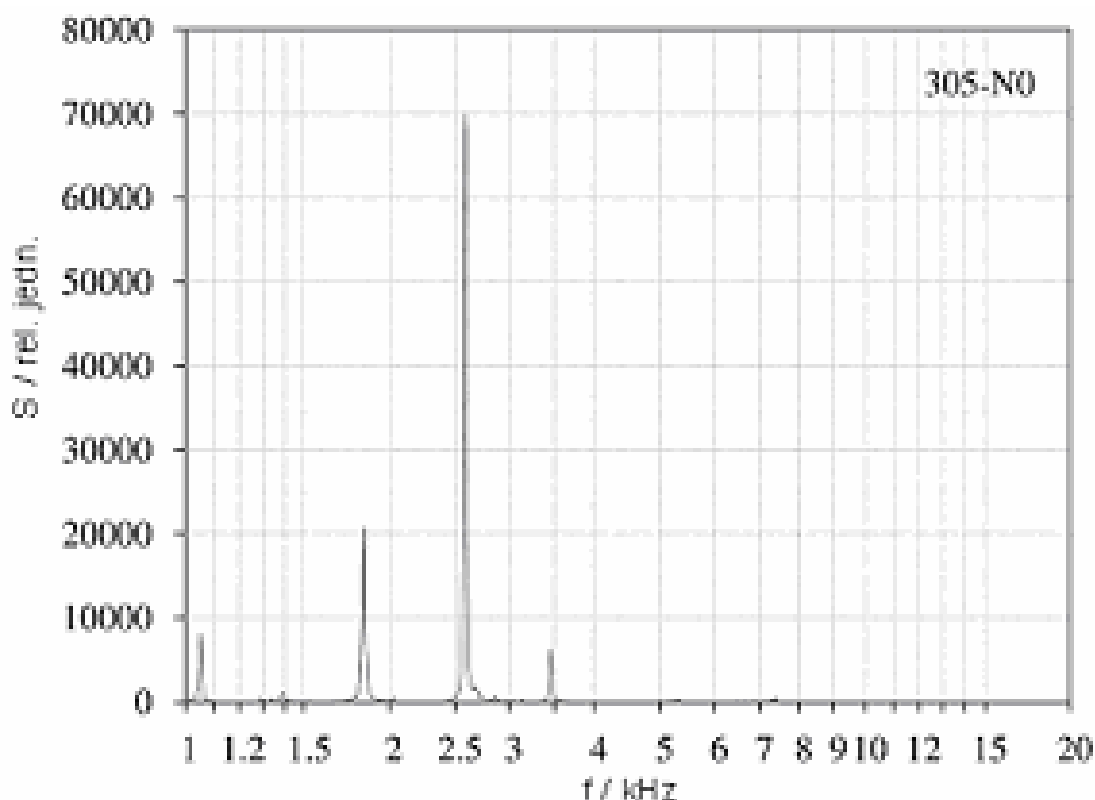
3.2.1 Měření akustických vlastností pálené krytiny

Testovány byly dvě skupiny pálených tašek typu bobrovka: skupina A – tašky ražené vyrobené v roce 1988 a skupina B – tašky tažené vyrobené v roce 2002. Obě skupiny tašek byly podrobeny zrychlené degradaci teplotním namáháním. Celkem byly aplikovány čtyři degradační cykly. Z důvodu verifikace výsledků použité metody a posouzení možnosti jejího využití pro hodnocení mrazuvzdornosti střešní krytiny byly stanoveny fyzikální vlastnosti testovaných tašek, jako je nasákavost, vztlínavost a pórovitost, které charakterizují mrazuvzdornost materiálu [18, 19].

Mechanický budící impuls byl realizován rázem kovového kladívka zavěšeného v kyvadlovém závěsu s nastavitelnou výškou zdvihu. Místo působení budícího impulsu a umístění snímače pro záznam odezvy bylo zvoleno na základě podrobného stanovení průběhů podélných a ohybových vln, kmíten a uzlových bodů. Zaznamenané časové realizace odezvy byly analyzovány pomocí FFT.

Výsledky měření

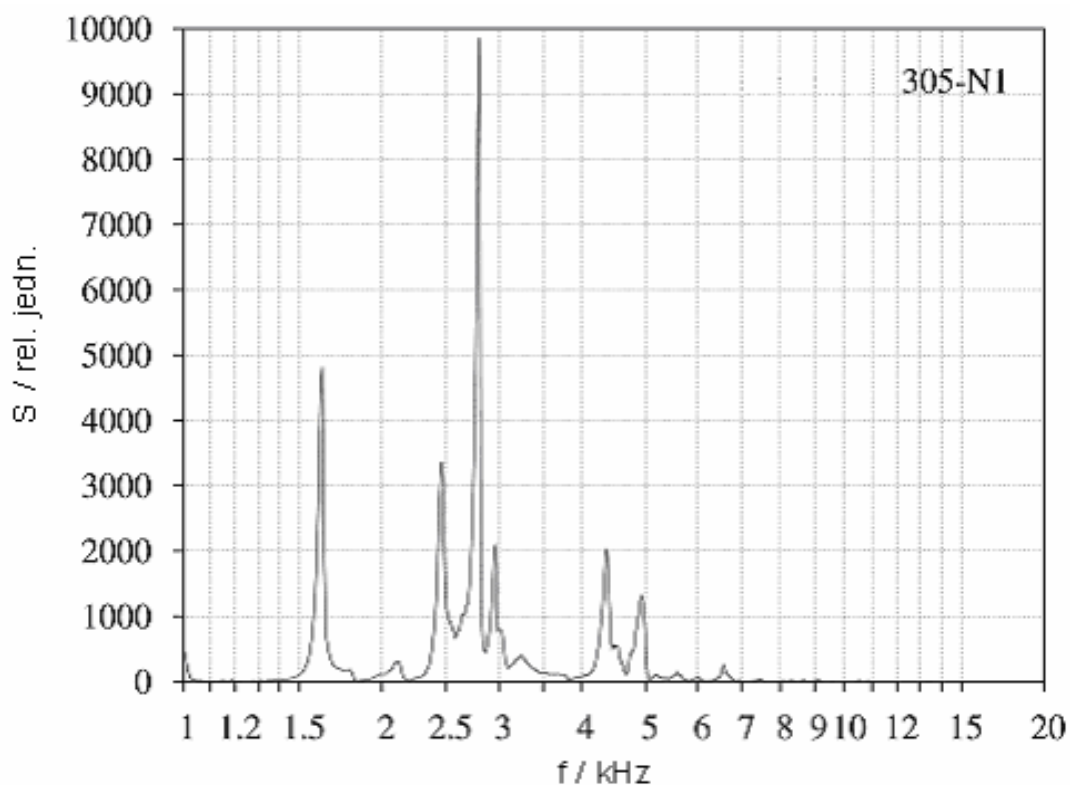
Z časových záznamů signálů odezvy byla vypočtena hodnota součinitele tlumení signálu ($u = u_0 e^{-\delta t}$). Pro tašku raženou č. 5 - skupina A, činila doba trvání odezvy před degradací $t_0 = 53$ ms. Vypočtená hodnota součinitele tlumení signálu $\delta_0 = 58 \text{ s}^{-1}$. Obr. 10 zobrazuje výsledek frekvenční analýzy odezvy této časové realizace. Dominantní frekvence je zde patrná na hodnotě $f_0 = 2\,591 \text{ Hz}$.



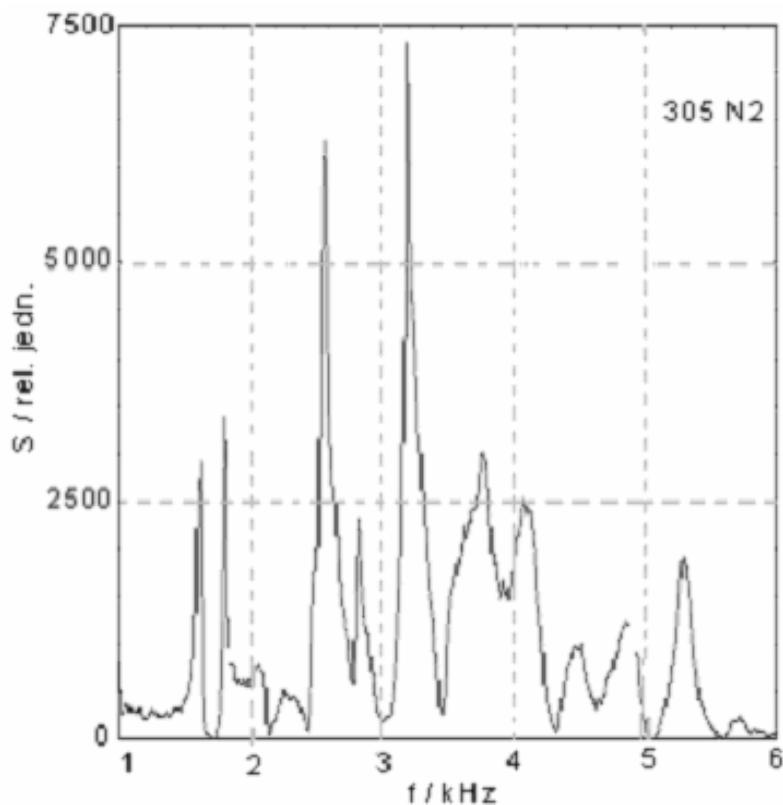
Obr. 10 Frekvenční spektrum odezvy tašky č.5 - před degradací:

Po působení jednoho degradačního cyklu realizovaného sníženou teplotou -70°C se doba trvání signálu odezvy signálu snížila na $t_1 = 38$ ms a hodnota součinitele tlumení vzrostla na hodnotu $\delta_1 =$

128 s⁻¹. Ze záznamu frekvenčního spektra odezvy na obr. 11 je patrný nárůst počtu významných frekvenčních složek v oblasti 1,5 kHz až 5 kHz a posun maxima na frekvenci $f_1 = 2801$ Hz.



Obr. 11 Frekvenční spektrum odezvy tašky č.5 – po jednom degradačním cyklu



Obr. 12 Frekvenční spektrum odezvy tašky č. 5 - po dvou degradačních cyklech

Frekvenční spektrum odezvy po aplikaci dvou degradačních cyklů je zobrazeno na obr. 12. Během tohoto degradačního cyklu došlo k vytvoření viditelné trhliny o tloušťce 0,5 mm – 1 mm téměř přes celou délku tašky. Výrazně vzrostl počet signifikantních frekvencí v oblasti 1,5 Hz až 5,5 kHz. Maximální hodnota se posunula na frekvenci $f_2 = 3\,198$ Hz, o 607 Hz výše oproti dominantní frekvenci před degradací tašky. Součinitel tlumení výrazně vzrostl na hodnotu $\delta_2 = 385\text{ s}^{-1}$. Třetí degradační cyklus vedl k totální destrukci tašky. Obdobných výsledků bylo dosaženo v případě všech tašek vyrobených ražením v roce 1988.

Výsledky měření tašek vyrobených tažením v roce 2002 – skupina B reprezentuje taška č. 24, výsledky jsou shrnuty v tab. 3. Před degradací činila hodnota součinitele tlumení $\delta_0 = 19\text{ s}^{-1}$ a hodnota dominantní frekvence $f_0 = 3\,234$ Hz. Po aplikaci čtyř degradačních cyklů vzrostl součinitel tlumení na hodnotu $\delta_4 = 53\text{ s}^{-1}$ a dominantní frekvence se posunula na hodnotu $f_4 = 3\,269$ Hz, tj. o 35 Hz. Došlo tedy pouze k nevýraznému posunu dominantní frekvence, což svědčí o malých strukturních změnách v testované tašce a lze usuzovat na její velmi dobrou odolnost proti mrazu. Obdobných hodnot bylo dosaženo u všech kusů zhotovených tažením v roce 2002.

Počet cyklů	δ / s^{-1}	f / Hz
0	19	3 234
1	22	3 239
2	34	3 244
3	38	3 249
4	53	3 269

Tab. 3 Hodnoty sledovaných parametrů tašky č. 24 - skupin B

Rovněž zjištěné hodnoty nasákavosti, vzlínavosti a pórovitosti splňovaly podmínky dobré mrazuvzdornosti tašek vyrobených tažením v roce 2002. Pro tašky vyrobené ražením v roce 1988 nesplňovaly tyto hodnoty požadavky na mrazuvzdornost.

Diskuze výsledků

Výsledky prokázaly reálnost využití analýzy odezvy na budící impuls pro posuzování mrazuvzdornosti pálené střešní krytiny. V procesu degradace (ochlazení máčených tašek na teplotu -70°C) docházelo k posunu dominantní frekvence směrem k vyšším frekvenčním složkám s nárůstem počtu aplikovaných degradačních cyklů. U tašek ražených – skupina A činil posun dominantní frekvence až tisíce Hz a současně narůstal počet výrazných frekvenčních složek. V případě tašek tažených - skupina B činil frekvenční posun pouze desítky Hz a nedocházelo k nárůstu významných frekvenčních složek.

Z důvodu ověření korelace uvedených frekvenčních změn s odolností tašek proti mrazu, byly stanoveny fyzikální vlastnosti (nasákavost, vzlínavost a pórovitost), pomocí jejichž hodnot lze hodnotit mrazuvzdornost keramických výrobků. Získané hodnoty potvrdily nízkou odolnost proti mrazu tašek ražených (z roku 1988) a jejich velmi rychlou degradaci, zatímco u tašek tažených (z roku 2002) byly zaznamenány hodnoty předpovídající velmi dobrou odolnost proti mrazu a jen nepatrné strukturní změny v průběhu zrychlené degradace. Bylo potvrzeno, že metoda impact-echo je citlivým indikátorem stavu struktury a je využitelná pro posuzování mrazuvzdornosti pálené střešní krytiny.

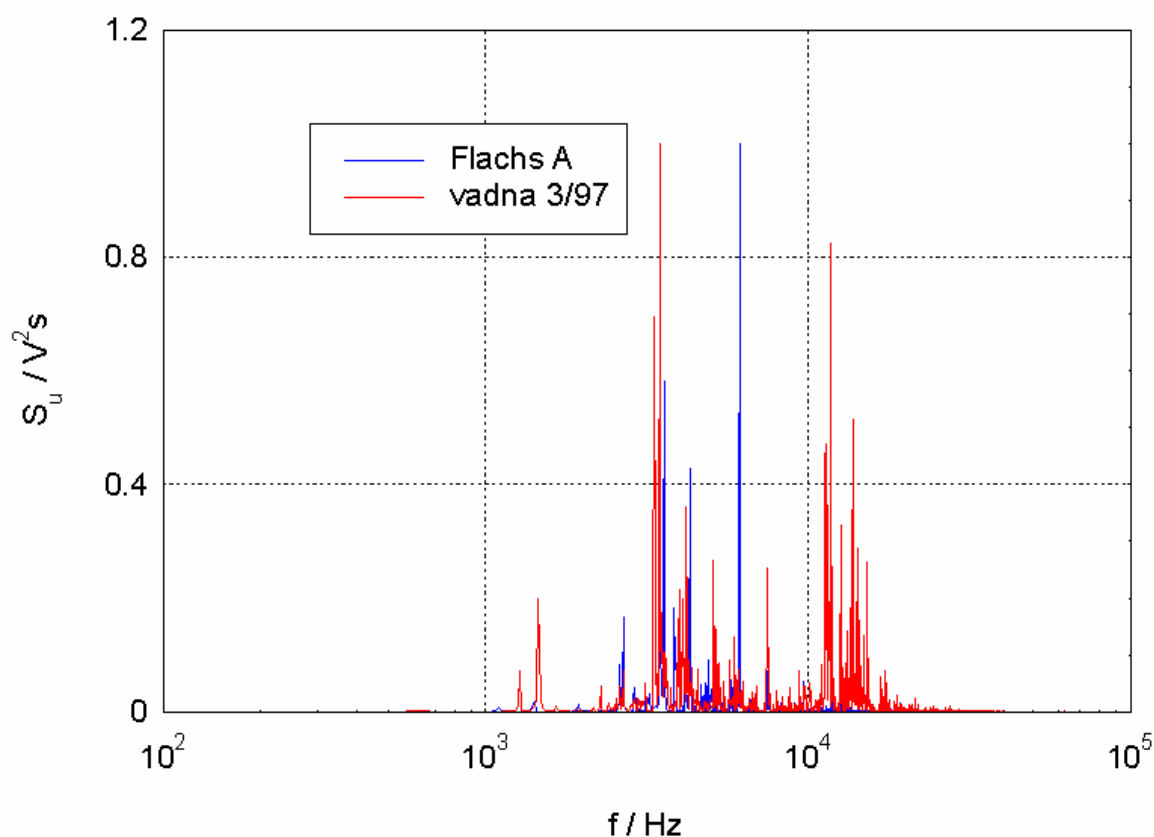
3.2.2 Diagnostika stropních desek Hurdis

Zkoumány byly objemové změny desek vlivem smršťování cementového potěru, které jsou jednou z příčin havárií stropních konstrukcí s deskami HURDIS. Experiment byl zaměřen na studium chování vrstvených (sendvičových) struktur. Poskytnuty byly kvalitní desky vyrobené v roce 2001 a stropní desky vyrobené v roce 1997.

Připraveny byly dva soubory stropních desek HURDIS: soubor šesti kusů desek bez viditelných trhlin, soubor šesti kusů stropních desek s poruchami (viditelné trhliny) a třetí soubor sestával ze šesti kusů sendvičů zhotovených z těchto desek, s různou tloušťkou cementového potěru a stejnou tloušťkou omítky [20]. Buzení bylo realizováno mechanickým impulsem vyvolaným jednak úderem kladívka na střed boční stěny hurdisky (kolmé na plochu s umístěným snímačem) a odezva byla snímána uprostřed spodní plochy hurdisky, která po zabudování tvoří podhled stropní konstrukce. Dále pak pádem ocelové kuličky na plochu se snímačem. Výsledkem měření jsou frekvenční spektra odezvy výrobků na realizovaný budící impuls [22].

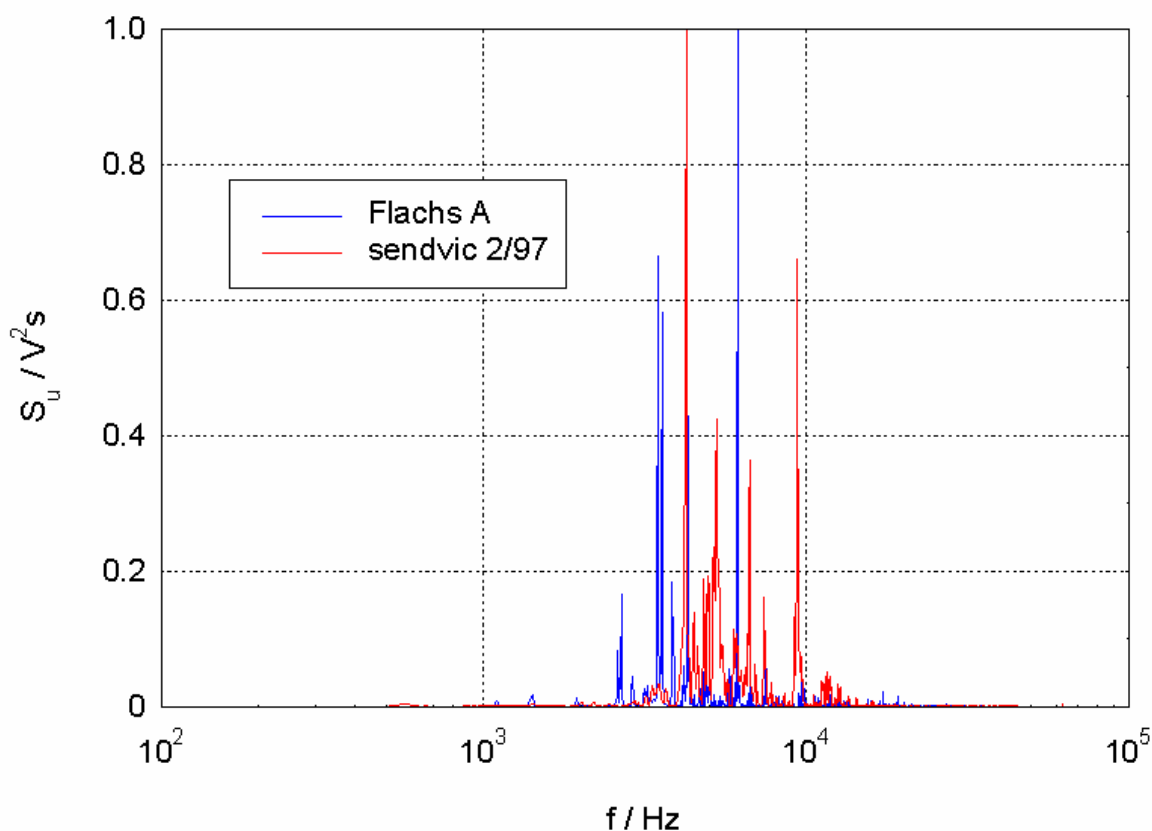
Výsledky měření

Grafy na obr. 13 a 14 zobrazují výsledky měření při buzení mechanickým impulsem, realizovaným úderem kladívka na boční stěnu desky. Na obr. 12 jsou porovnána spektra desky (Fl 01 A) z hlediska celistvosti struktury vyhovující a desky obsahující trhliny H 3/97. Z grafu je patrné, že v případě kvalitního výrobku jsou výrazné hodnoty rozloženy v poměrně úzkém frekvenčním rozsahu (2,5 – 6,2 kHz) s maximální hodnotou na frekvenci 6,2 kHz. U vzorku s trhlínami se výrazné frekvenční složky vyskytují v podstatně širší frekvenční oblasti (1,5 kHz – 15 kHz), nastal posun maximální hodnoty na frekvenci 4,3 kHz, avšak současně byl zvýrazněn úzký frekvenční rozsah 10 – 15 kHz.



Obr. 13 Frekvenční spektrum odezvy, deska dobrá (Flachs A), vadná (3/97)

Obr. 14 analogicky porovnává frekvenční závislosti desky dobré Flachs A a sendviče S 2/97. Opět došlo k posunu dominantní frekvence na nižší hodnotu ve frekvenčním spektru odezvy sendviče a zvýraznění vyšší frekvenční oblasti, avšak nedošlo k nárůstu počtu signifikantních frekvenčních složek.



Obr. 14 Frekvenční spektrum odezvy, deska dobrá (Flachs A), sendvič (2/97)

Diskuze výsledků

Experimenty provedené na výše popsaných sendvičích potvrdily vznik trhlin ve stropní desce během sedmi dnů po provedení betonových vrstev. V případě všech zhotovených sendvičů došlo k narušení strukturní celistvosti desek. Výsledky měření ukazují, že po dopracování metody se jeví perspektivní nalezení výše definovaných vad na laboratorních vzorcích. Z hlediska nutnosti rychlého získání prvních výsledků, byl pro měření dodán statisticky nedostatečný počet kusů těchto desek a to jak nepoškozených tak i vadných. Dosažené výsledky jsou však inspirující pro pokračování v tomto výzkumu.

3.2.3 Diagnostika koroze ocelové výztuže

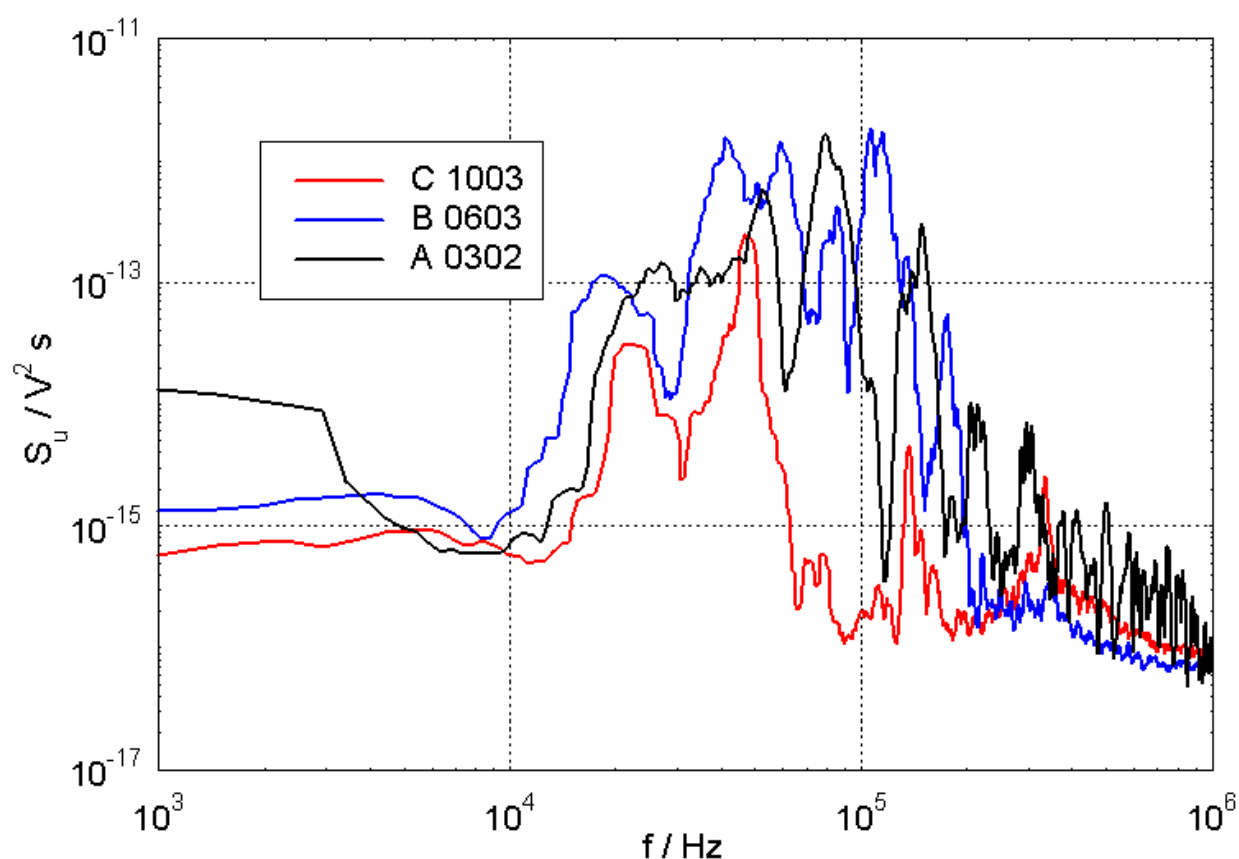
Monitorována byla postupující koroze ocelové výztuže v atypických železobetonových vzorcích [23]. Měření byla aplikována na atypických zkušebních trámcích podrobených zrychlené korozi. Během jednoho korozního cyklu byly vzorky po dobu jednoho měsíce opakovaně ponořovány na 16 hodin do korozního roztoku a poté vysoušeny v elektrické sušárně při teplotě 40 °C po dobu 8 hodin. Budící impuls byl vytvářen jednak elektrickým impulsem přivedeným na ocelovou výztuž a jednak mechanickým impulsem vyvolaným úderem kladívka na betonový

povrch vzorku. Odezva vzorku byla snímána současně na výztuži a na betonu. Analyzována byla frekvenční spektra zaznamenaných signálů odezvy.

Výsledky měření

Výsledky měření reprezentuje vzorek č. 30 podrobený celé sérii korozních cyklů. Vzorky byly po posledním měření (C 1003) destruovány a byl stanoven hmotnostní úbytek ocelové výztuže vlivem koroze, který činil v případě uvedeného vzorku 14,05 %. Pro lepší přehlednost jsou v grafech uvedeny pouze výsledky měření, kdy došlo ke změnám ve frekvenčních spektrech. Křivky zobrazující jednotlivá spektra jsou označeny daty měření, přičemž křivky označené A 0302 odpovídají prvnímu měření, křivky B 1003 odpovídají v pořadí osmému měření, výsledky předchozích měření (druhého až sedmého) nevykazovaly podstatné rozdíly. Křivky označené C 1003 odpovídají devátému poslednímu měření.

Obr. č. 15 zobrazuje frekvenční spektra odezvy vzorku č. 30 na elektrický impuls přivedený na výztuž a snímáný na výztuži.



Obr. 15 Vzorek č.30, budící impuls elektrický, snímač na výztuži, A,B,C - data měření

Křivka A 0302 zobrazuje frekvenční spektrum odezvy prvního měření. Uplatňují se v něm složky v širokém frekvenčním rozsahu od 15 kHz do 320 kHz odpovídající vlastním frekvencím a vyšším harmonickým, s maximálními hodnotami na frekvencích 50 kHz a 75 kHz. V případě křivky B 0603 je frekvenční spektrum mírně posunuto k nižším frekvencím a patrná je rovněž změna ve frekvenčním rozsahu 200 kHz až 400 kHz. Utlumeny jsou zde vyšší frekvenční složky a tato oblast je zvýrazněna pozvolným nárůstem hodnot s maximem na frekvenci 350 kHz a dále pak pozvolným poklesem hodnot. Tato změna je zřejmě vyvolána vznikem mikrotrhlin v pojivu (mezi výztuží a betonem). Zcela odlišný průběh vykazuje křivka C 1003, kdy tlakem korozní vrstvy, která zvětšovala svůj objem byla vizuálně porušena struktura vzorku. Silné porušení struktury se projevilo ve frekvenčním spektru dvěma charakteristickými oblastmi. Přitom první oblast zřejmě

odpovídá betonové části vzorku a ve druhé frekvenční oblasti se projeví důsledky vlastní koroze výztuže. První oblast ve frekvenčním rozsahu 10 kHz až 100 kHz je charakterizována širším maximem se střední frekvencí 50 kHz a další výrazná hodnota se nachází na střední frekvenci 20 kHz. Druhá frekvenční oblast 100 kHz až 1000 kHz obsahuje dvě maxima srovnatelných absolutních hodnot. První se střední frekvencí 150 kHz a druhé v pásmu 300 kHz – 400 kHz. První maximum zřejmě souvisí s lokálním oddělením výztuže od betonu a odštěpeným pojivem podél výztuže, frekvence v rozsahu 100 kHz – 150 kHz. Frekvenční složky v rozsahu 300 kHz – 400 kHz odpovídají mikrotrhlinám a trhlinám podél výztuže [8].

Diskuze výsledků

Při všech variantách měření byly prokázány frekvenční změny ve spektrech snímaného signálu korelující s časově podmíněnými změnami vnitřní struktury zkoumaných vzorků v důsledku počínající koroze výztuže. Důsledky postupující koroze výztuže s rostoucím počtem korozních cyklů se projevovaly změnami ve frekvenčních spektrech snímaného signálu odezvy vzorků. Silnější korelace mezi frekvenčními změnami odezvy a vnitřní strukturou bylo dosaženo při variantě buzení elektrickým impulsem.

4 NELINEÁRNÍ AKUSTICKÁ SPEKTROSKOPIE

Nelineární akustická spektroskopie reprezentuje nové možnosti v akustickém nedestruktivním testování poškození materiálů. Na základě studia nelineárních efektů byly navrženy nové diagnostické a defektoskopické metody jejichž podstatou je nelineární spektroskopie pomocí elastických vln. Detailním studiem dynamických nelinearit a hystereze v nehomogenním prostředí bylo zjištěno, že výskyt mezoskopických elementů ve struktuře materiálu vyvolává silné nelineární dynamické jevy při šíření elastických vln. Tyto nelineární jevy jsou přitom v průběhu degradace materiálu pozorovány daleko dříve než můžeme pozorovat změny lineárních parametrů (rychlosti šíření, útlumu apod.) vyvolané poškozením. Nelineární parametry se ukázaly být velmi citlivé na přítomnost jakýchkoliv nehomogenit a na rostoucí poškození struktury materiálu. Tímto nelineární vlnové metody poskytují nové možnosti akustického nedestruktivního testování: nabízejí dříve netušené citlivosti, rychlost aplikace a snadnou interpretaci.

Přesto, že má tato problematika charakter spíše základního výzkumu, je předpoklad poměrně rychlého a rozsáhlého zavedení nových defektoskopických metod či zvýšení výtěžnosti a spolehlivosti dosavadních metod v praxi, právě ve stavebnictví. Výzkum v této oblasti je podporován projektem GA ČR 103/06/1711 „Defektoskopie železobetonových dílců a konstrukcí metodami nelineární akustické spektroskopie“ a je zaměřen především na následující problémy:

- teoretické modelování nelineárních jevů v testovaných materiálech
- vývoj a systematické zdokonalování měřicí aparatury
- rozsáhlé experimentální práce pro statisticky podloženou analýzu naměřených dat a ověřování mezi pro vytvoření měřících metodik pro aplikace ve stavebnictví.

4.1 NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPICKÉ METODY

Rozpracované byly dvě skupiny metod zaměřených na akustickou nelinearitu odezvy materiálu rezonanční a nerezonanční.

4.1.1 Metody rezonanční

V první skupině metod používaných u těles s vysoce rezonančními projevy se využívá především měření nelineárního efektu posunu rezonančního kmitočtu v závislosti na intenzitě budícího signálu. V odezvě vzorků jsou detailně vyšetřovány frekvenční posuny rezonančního

maxima jednoho vlastního módu v závislosti na změnách amplitudy buzení. U nepoškozeného vzorku je rezonanční frekvence s amplitudou neměnná, v poškozeném vzorku se s amplitudou mění tvar rezonanční křivky a posouvá se vrchol rezonančního maxima [25].

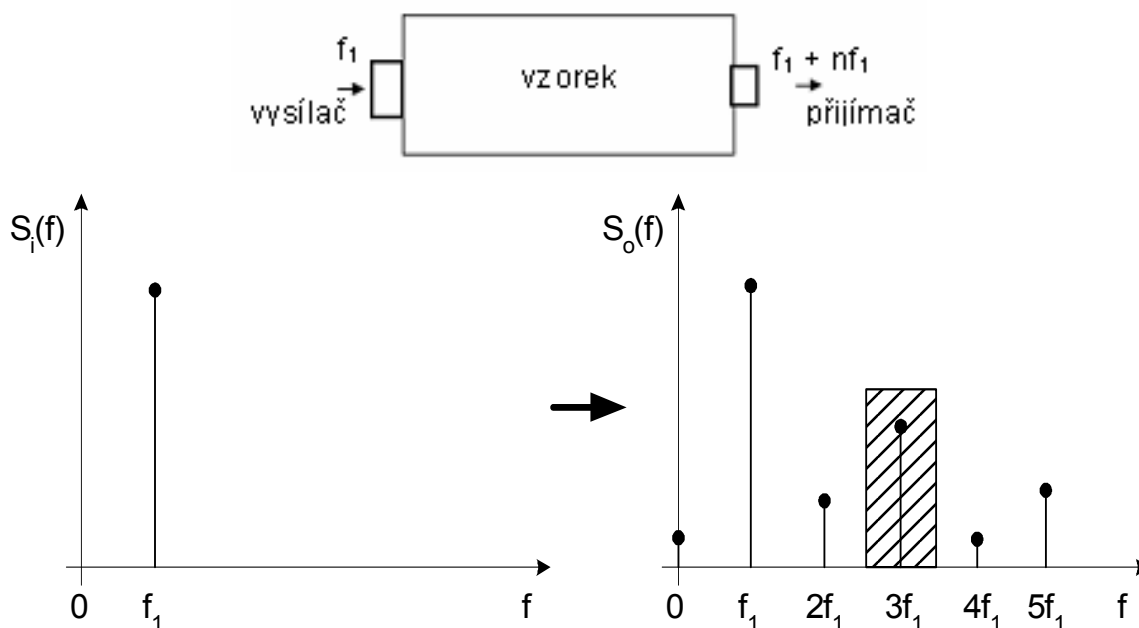
4.1.2 Metody nerezonanční

Pro tělesa s potlačenými rezonančními vlivy se využívají nerezonanční metody, vyhodnocující vliv nelinearity na procházející akustický signál. Tyto metody lze rozdělit do dvou skupin [28]:

- 1) měření s jedním harmonickým ultrazvukovým signálem (jeden kmitočet f_1)
- 2) měření s více harmonickými ultrazvukovými signály (obvykle dva kmitočty f_1 a f_2).

V prvním případě (obr. 16) způsobuje nelinearita vznik dalších harmonických signálů f_v s kmitočty dle Fourierova rozvoje

$$f_v = n f_1 \mid n = 0, 1, 2, \dots \infty . \quad (2)$$



Obr. 16 Frekvenční spektrum odezvy nelineárního prostředí

Amplitudy těchto složek obecně klesají s růstem přirozeného čísla n . Může se však také projevit menší amplituda druhé a dalších sudých harmonických složek v porovnání s lichými složkami při malé nesymetrii vlivu nelinearity. Důležitý je tedy výrazný projev třetí harmonické složky mezi nově vzniklými frekvencemi a proto je nejčastěji vyhodnocována její amplituda.

Druhý případ spočívá v současném buzení zkoušeného tělesa dvěma odlišnými frekvencemi f_1 , f_2 . V důsledku nelinearity materiálu vzniknou další harmonické signály f_v podle vztahu

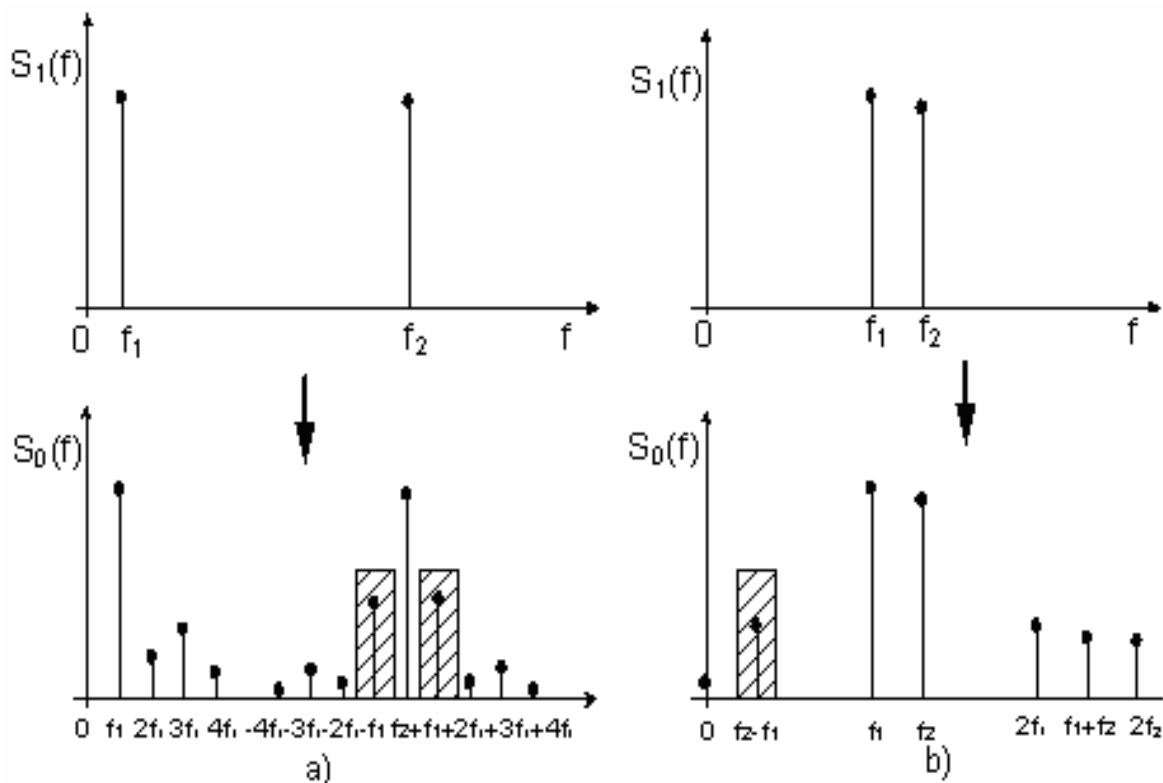
$$f_v = \mid \pm m f_1 \pm n f_2 \mid \mid m, n = 0, 1, 2 \dots \infty . \quad (3)$$

V tomto případě vzniká podstatně vyšší počet harmonických složek a kromě vyšších harmonických složek od obou budících harmonických signálů vznikají součtové a rozdílové složky (postranní pásma). Vzhledem k obecné zákonitosti poklesu amplitud výsledných složek s růstem přirozených čísel m a n jsou nejvýraznější první součtové a rozdílové složky s frekvencemi

$$f_v = \mid \pm f_1 \pm f_2 \mid . \quad (4)$$

Tyto metody mají dvě základní varianty, které lze rozlišit podle relativního poměru hodnoty kmitočtů f_1 a f_2 . Lze je přirovnat k radiotechnickým principům AM modulace a směšování. V prvním případě mají dva harmonické kmitočty řádově odlišnou hodnotu, jeden je

nízkofrekvenční a druhý vysokofrekvenční. Při interakci těchto signálů s defektem vznikne úzkopásmový AM signál a kromě původního kmitočtu f_2 se objeví postranní složky $f_2 \pm n f_1$, viz obr. 17a. Pro detekci a měření součtové a rozdílové složky lze použít buď spektrální analýzu (velmi jemné rozlišení složek spektra), anebo synchronní demodulaci s následnou analýzou nízkofrekvenčního signálu. Druhý případ využívá směšovacího principu, kdy oba budící signály mají relativně blízké hodnoty kmitočtů a první rozdílová složka má naopak poměrně nízkou hodnotu, viz obr. 17b. V tomto případě je, vzhledem k relativně velkému rozdílu kmitočtů budících signálů a kmitočtu měřené rozdílové složky, evidentní výhoda možnosti přímé detekce této rozdílové složky s použitím analogové předfiltrace s vysokým dynamickým rozsahem (≈ 120 dB i více).



Obr. 17 Kmitočtové spektrum při průchodu dvou signálů nelineárním prostředím:
a) AM modulace s velkým poměrem f_2/f_1 , b) směšování s malým poměrem f_2/f_1

Časový rozměr působení budících signálů se projevuje ve třech výrazných případech. V obou základních variantách kmitočtového působení 1) a 2) lze při měření pracovat ve spojitém či impulsním režimu.

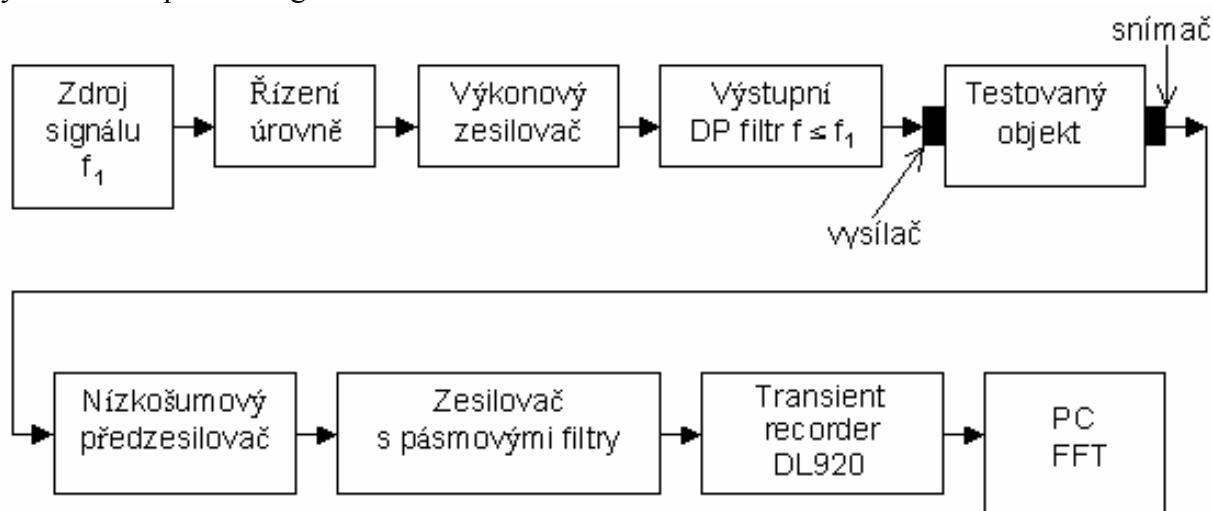
4.2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro první experimenty bylo přístrojové vybavení, pro měření s jedním budícím kmitočtem, sestaveno z běžně dostupných komponent a speciálně zhotovených částí. Možnosti praktické aplikace této metody byly ověřovány při testování pálené střešní krytiny a současně byly ukázány problémy této aplikace. Při použití kontinuálního buzení při nižším i vyšším kmitočtu lze dosáhnout na jednu stranu poměrně velké energie budícího i měřeného signálu, ale vzhledem ke kontinuálnímu rozložení nehomogenity materiálu a lokálnímu působení defektů docházelo při integrálním měření k podstatnému snížení rozdílu sledovaného zkreslení na defektu a zkreslení pozadí. Navíc při vysokém kmitočtu docházelo k velkému vlivu lokálně odlišně působících stojatých vln [30].

Proto byla druhá fáze zaměřena na metodu s časovým rozlišením zkreslení, která se jevila jako nejperspektivnější. S tímto cílem bylo upraveno i měřicí zařízení [31].

4.2.1 Měřicí zařízení

Měřicí zařízení sestává ze dvou hlavních větví: vysílací a přijímací. Vysílací část měřicího zařízení je tvořena čtyřmi hlavními bloky. Jsou to generátor harmonického signálu s řízením úrovně, výkonový zesilovač s maximálním výkonem 100 W a dostatečně nízkým zkreslením a výstupní filtr typu dolní propust pro potlačení vyšších harmonických složek a pro zabezpečení vysoké čistoty budícího harmonického signálu. Hlavní větev přijímací části má ve vstupu zesilovač s filtry pro zabezpečení minimalizace vzniku zkreslení v přijímací cestě a zesilovač s pásmovými filtry. Po zesílení byl signál ze snímače vzorkován transient recorderem DL920 a uložen do paměti počítače k vyhodnocení, obr. 18. Výsledkem měření byla frekvenční spektra vyhodnocená pomocí algoritmu FFT.



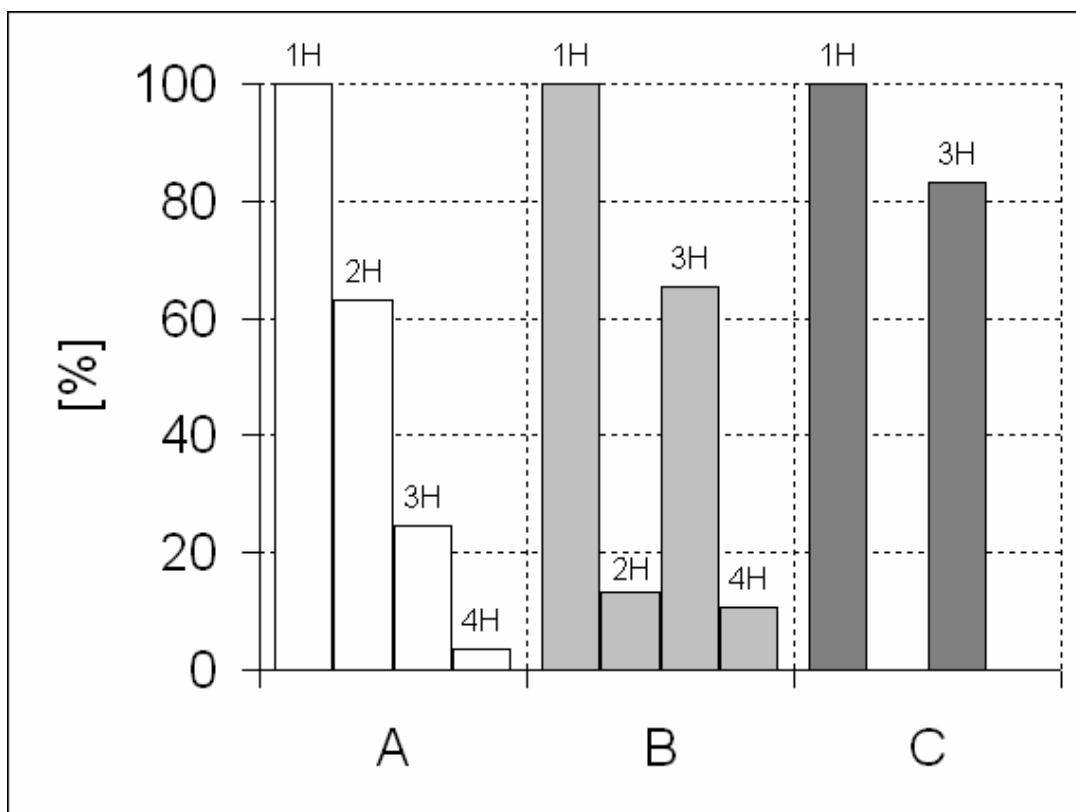
Obr. 1 Blokové schéma měřicího zařízení s jedním budícím signálem

4.2.2 Testování keramických dlaždic

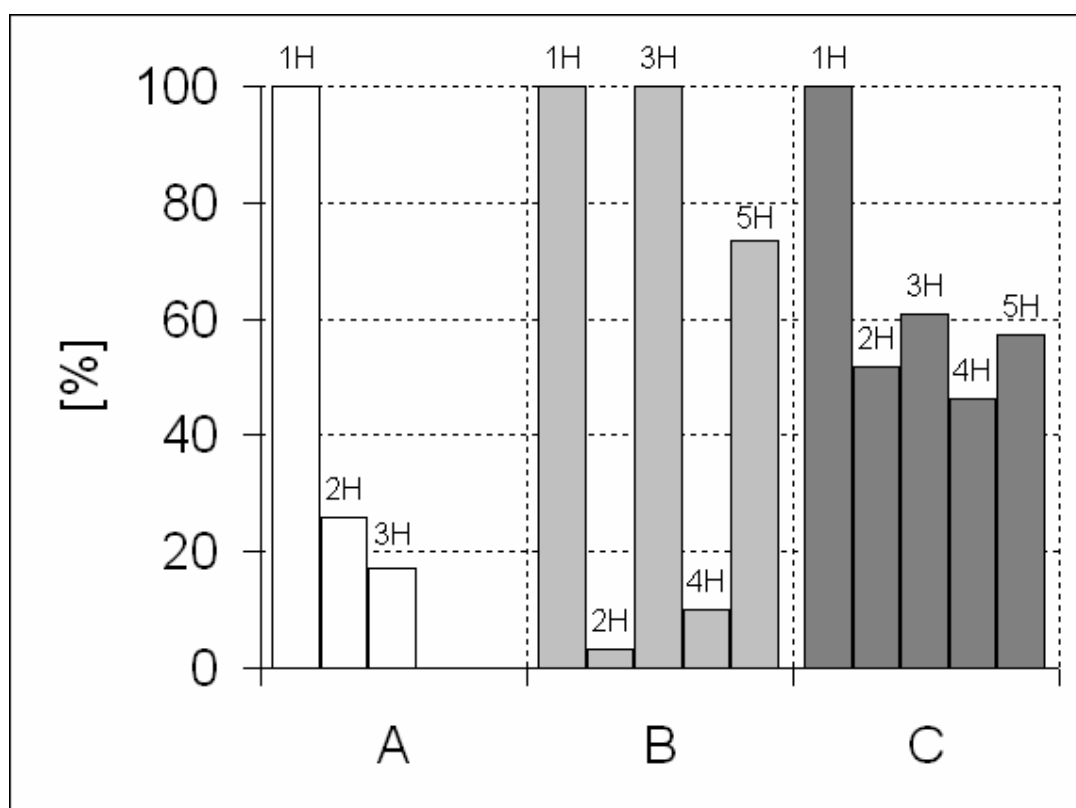
Testovány byly keramické dlaždice dodané z výroby jako kvalitativně vyhovující [32]. Rozděleny byly do tří skupin: v první A skupině byly dlaždice zachovány v dodaném stavu, druhá B skupina byla podrobena tepelnému namáhání třemi sty zmrazovacími cykly a třetí C skupina byla vystavena čtyřem degradačním cyklům v parách tekutého dusíku.

Výsledky měření

Výsledky měření keramických dlaždic zobrazují obr. č. 19 a 20. Jsou na nich vzájemně porovnány hodnoty amplitud vyšších harmonických frekvencí, normalizované na hodnotu amplitudy první harmonické frekvence ($f_1 = 24,5$ kHz), získané ze dvou variant měření. Na obr. 19 jsou zobrazeny výsledky odezvy zaznamenané snímačem umístěným na glazovaném povrchu dlaždice. V případě dlaždice A (nezatěžované) je patrný přirozený pokles vyšších harmonických složek s jejich rostoucím pořadím. Odezva vzorku B, po tepelném zatěžování třemi sty zmrazovacími cykly obsahuje dvě dominantní frekvenční složky – první (1H) a třetí (3H) harmonickou, mírně jsou zvýrazněny druhá (2H) a čtvrtá (4H) harmonická. V případě vzorku C, ochlazování v parách tekutého dusíku, jsou zcela potlačeny sudé harmonické složky a dominují první (1H) a třetí (3H) harmonická. Strukturální poruchy vzniklé v důsledku tepelného namáhání byly zřejmě příčinou nelinearity v odezvě vzorků na budící frekvenci. Obdobné výsledky byly získány i při snímání odezvy na hraně vzorku, obr. 20.



Obr. 19. Normalizované hodnoty amplitud odezvy, snímač umístěn na glazovaném povrchu



Obr. 20 Normalizované hodnoty amplitud odezvy, snímač umístěn na hraně

Diskuze výsledků

Výsledky měření prokázaly, že nelineární techniky jsou vysoce citlivé metody detekce ranných stádií poškození. Nelinearita materiálů způsobená vznikem defektů v důsledku tepelného zatěžování vzorků se projevila změnami ve frekvenčních spektrech. Defekty ve struktuře materiálu způsobily potlačení, případně absenci sudých harmonických složek a dominantní nárůst amplitud na lichých harmonických frekvencích.

5 ZÁVĚR

Výsledky prokázaly reálnost využití uvedených akustických metod pro diagnostiku struktury stavebních dílců a konstrukcí.

Pro hodnocení železobetonových prvků a konstrukcí z hlediska korozního napadení ocelové výztuže a jeho důsledků se osvědčila metoda akustické emise. Při laboratorních experimentech byla využívána jako porovnávací metoda. Na základě změn parametrů získaných z časového průběhu sejmutého signálu oproti referenčním vzorkům lze diagnostikovat korozi výztuže. Pro určení příčiny vzniku emisní události je nutno provést frekvenční analýzu spektra snímaného signálu. Nalezena a ověřena byla korelace mezi frekvenčními složkami a důsledky postupující koroze výztuže [8].

Impact – echo metoda byla využita pro diagnostiku struktury keramických výrobků a železobetonových vzorků. Byla ověřena možnost využití této metody pro hodnocení strukturní celistvosti a mrazuvzdornosti střešní pálené krytiny. Výsledky měření byly verifikovány testováním dalších fyzikálních vlastností predikujících mrazuvzdornost těchto výrobků.

V případě stropních desek Hurdis a sendvičů zhotovených z těchto desek byla metoda využita pro detekci účinků smršťování betonové vrstvy. Experimenty provedené na výše popsaných sendvičích potvrdily vznik trhlin v deskách během sedmi dnů po provedení betonových vrstev v případě všech takto zhotovených sendvičů.

Výsledky monitorování postupující koroze ocelové výztuže v železobetonových vzorcích po jednotlivých sériích korozních cyklů prokázaly frekvenční změny ve spektrech snímaného signálu a jejich korelaci s časově podmíněnými změnami vnitřní struktury zkoumaných vzorků v důsledku počínající koroze výztuže v železobetonu. Při měření byl potvrzen výskyt frekvenčních složek charakterizujících postupující korozi a její důsledky dle [8]. Výsledky byly využity pro stanovení metodiky a realizaci měření na reálných mostních konstrukcích. Poznatky získané z měření mostních konstrukcí byly využity pro sestavení návrhu Technických podmínek „Diagnostický průzkum mostů PK“, postupy monitorování a vyhodnocení koroze výztuží v betonu metodou akustické emise.

Na základě studia nelineárních metod bylo navrženo a realizováno měřicí zařízení pro metodu s jedním budícím harmonickým kmitočtem. Při měření střešních tašek byly získány první poznatky z aplikace metody pro diagnostiku struktury keramických materiálů, byl stanoven vhodný budící kmitočet a upraveno měřicí zařízení. Výsledky měření keramických dlaždic, bez zatěžování a po teplotním zatěžování ve dvou různých režimech, prokázaly jednoduchou interpretaci použité metody nelineární akustické spektroskopie na poruchy ve struktuře vzorků. Vysoká citlivost metody se projevila zejména v případě dlaždic různě tepelně zatěžovaných, patrně byly rozdíly i mezi frekvenčními spektry odpovídajícími dlaždicím po rozdílném tepelném namáhání (-70°C a $\pm 5^{\circ}\text{C}$). Díky relativně snadné aplikaci a interpretaci výsledků a rovněž vysoké spolehlivosti se tato metodologie jeví jako výhodný prostředek také pro kontinuální monitorování stavu stavebních prvků a konstrukcí od jejich výroby až po dlouhodobé využívání.

6 POUŽITÁ LITERATURA (VÝBĚR)

- [1] EMMONS, P. H., DROCHYTKA, R., JEŘÁBEK, Z.: Sanace a údržba betonu v ilustracích. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1999, 327 s. ISBN 80-7204-106-1
- [2] CULLINGTON, D. W., BRADBURY, T., PAULSON, P. O.: Continuous Acoustic Monitoring of Steel Tendons and Cables in Bridges. In: Bridge Engineering Conference, April 2000, Guildford, United Kingdom
- [3] JOHN C. DUKE: Health monitoring of post tension tendons. Final contract report, Project No. 02-0178-07, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, October 2002
- [4] COLOMBO, S., MAIN, I. G., FORDE, M. C., HALLIDAY, J.: Acoustic Emission on Bridges: Experiments on Concrete Beam. In: Proc. of 25th European Conference on Acoustic Emission Testing, Volume I, Prague, 11-13 September 2002, pp. 127 – 134, ISBN 80-214-2174-6
- [5] GOLASKI, L., GEBSKI, P., ONO, K.: Diagnostics of Reinforced Concrete Structures by Acoustic Emission. In: Proc. of 25th European Conference on Acoustic Emission Testing, Volume I, Prague, 11-13 September 2002, pp. 207 – 215, ISBN 80-214-2174-6
- [6] SCHECHINGER, B., VOGEL, T.: A deeper understanding of acoustic emission wave propagation in reinforced concrete. Nondestructive testing in civil engineering, DGZfP: BAM, 2003, CD
- [7] MURAVIN, G., LEZVINSKY, L., MURAVIN, B. (Izrael): Acoustic Emission Diagnostic of Reinforced Concrete Bridges Condition. In: Progress in Acoustic Emission IX, Proceedings of the 14th International Acoustic Emission Symposium, Big Island, Hawaii, USA, August 9-14, 1998, pp. II/89-II/98
- [8] MURAVIN, G. B., MAKAROVA, N. O.: Diagnostic of Process of Metal Corrosion in Concrete. Defektoskopija, 1991, No. 10/91, pp. 22-29
- [9] MURAKAMI, Y., SHIGENORI, Y.: Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Reinforced Concrete Beams Deteriorated Due to Corrosion of Reinforcement. In: Progress in Acoustic Emission VIII, The Japan Society for NDI, 1996, pp. 217-224
- [10] M. KOŘENSKÁ, L. PAZDERA, Z. CHOBOLA, K. POSPÍŠIL, J. STRYK: Nondestructive Testing of Reinforced Bridges by Acoustic Emission Method. In: Proc. of the International Conference Life Cycle Assessment, Behaviour and Properties of Concrete and Concrete Structures, Nov., 9-11, 2004, Brno, pp. 223- 228, ISBN 80-214-2370-6
- [11] M. KORENSKA, L. PAZDERA, K. POSPISIL, J. STRYK, P. VYROUBAL: Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders. In: Proc. of The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3 September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5
- [12] SANSALONE, M: Impact-Echo: The Complete Story. ACI Structural Journal, Vo. 94, No. 6, November-December, 1997, pp. 777-786
- [13] CHENG, C. and SANSALONE, M.: Effects on Impact-Echo Signals Caused by Steel Reinforcing Bars and Vois Around Bars. ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, September-October 1993, pp.421 – 434
- [14] CARINO, N. J. and SANSALONE, M.: Flaw Detection in Concrete Using the Impact-Echo Method. In: Proceedings. of NATO Conference on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, A. S. Novak, Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1990, pp. 101 – 118
- [15] BENTRUP, H., FRANKE, L.: Evaluation of the frost resistance of bricks in regard to long service life. Ziegelindustrie International, Nr. 7-8, s. 483 - 492, Nr. 9, s. 528-536, 1993
- [16] FRIESE, P.: Predictions of the Frost Resistance of Bricks. Ziegelindustrie International, Nr. 12, s. 952-963, 1995

- [17] KOŘENSKÁ, M.: Aktivní akustická emise pálené krytiny. In: Konference Akustická emise, Sborník referátů, ČNDT, Odborná skupina Akustická emise, Ústav fyziky, FAST VUT Brno, 18.-19.6.1996, s. 40 - 43, ISBN 80-214-1883-4
- [18] KORENSKA, M., CHOBOLA, Z., MIKULKOVA, P., MARTINEK, J.: On the Application of Impact-Echo Method to Assess the Quality of Ceramic Roofing Tiles. In: Proceedings of the Fourth Conference, Material Problems in Civil Engineering, MATBUD'2003, Krakow University of Technology Poland, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej Dział - Poligrafii, pp. 239 - 244, (2003)
- [19] M. KOŘENSKÁ, P. MIKULKOVÁ, I. PLŠKOVÁ, J. MARTÍNEK, Z. CHOBOLA: Fired Roofing Tiles Water Absorption Capacity and Resonance Frequencies. In: Proc. of 34th International Conference and NDT Technique Exposition, Defektoskopie 2004, November 3-5, 2004, Špindlerův Mlýn, pp. 89 - 92, ISBN 80-214-2749-3
- [20] Rozbor příčin poruch s deskami HURDIS. Studie pro Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, Praha 2001
- [21] BOUŠKA, P.: *Poruchy stropních konstrukcí s deskami HURDIS*. Habilitační práce, ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Praha, 2002
- [22] M. KORENSKA, L. PAZDERA, J. SMUTNÝ, Mo. KORENSKA: Detecting Failure of Sandwich Plate with Hourdis by Using of Impulse Response Analyse. NDT Welding Bulletin, roč. 12, 4/2002, pp. 31 - 34, ISSN 1213-3825
- [23] M. KORENSKA, Mo. KORENSKA, K. POSPISIL: Evaluation of Structural Integrity in Reinforced Concrete Beams Deteriorated Due to Corrosion of Reinforcement. In: Proc. of 32st International Conference, Defektoskopie 2002, November 19-21, 2002, Liberec, pp.101 - 105, ISBN 80-214-2247-5
- [24] <http://ciks.cbt.nist.gov/~carino/ieprin.html>
- [25] VAN DEN ABEELE, K. E., CARMELIET, J.: Single Mode Nonlinear Resonant Acoustic Spectroscopy (SIMONRAS) for Damage Detection in Quasi-brittle Materials. <http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwk/sr99/bwf.htm#bf1.1>
- [26] VAN DEN ABEELE, K. E., CARMELIET, J., TENCATE, J., JOHNSON, P. A.: Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy. Res. Nondestr. Eval. 12/1, pp. 31 - 42, 2000, <http://perswww.kuleuven.ac.be/~u0004811/simonras.pdf>
- [27] LITWILLER, R. G.: Resonant Ultrasound Spectroscopy and the Elastic Properties of Several Selected Materials. <http://www.kristall.ethz.ch/rigi2002/abstracts/abstract-leisure.pdf>
- [28] KAZAKOV, V., JOHNSON, P. A.: Modulation Acoustic Method of Crack Location. In: 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, Russia, August, 2002
- [29] Nonlinear Acoustic Techniques for Micro-Scale Damage Diagnostics (NATEMIS). An ESF scientific programme, <http://www.esf.org/publication/125/Natemis.pdf>
- [30] M. KORENSKA, J. SIKULA, K. HAJEK: Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Fired Roof Tiles. In: 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, August 30-September 3, 2004, Book of Abstracts, pp. 42, CD
- [31] K. HÁJEK, M. KOŘENSKÁ A J. ŠIKULA: The Rising of a Practical Sensitivity of the Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy with One Exciting Signal. In: Proc. of 34th International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2004, November 3-5, 2004, Špindlerův Mlýn, pp. 51 - 58, ISBN 80-214-2749-3
- [32] M. MATYSIK, M. KORENSKA, M. MANYCHOVA, L. PAZDERA: Acoustic Method Based Diagnostics of Ceramic Tiles Structure Integrity. In: Proc. of Workshop NDT 2005, November 30, 2005, Brno University of Technology, pp. 100 – 105, ISBN 80-7204-420-6.

ABSTRACT

The lack of non-destructive methods to be applied in the defectoscopy of inhomogeneous materials and complex-form bodies, by means of which the internal structure of buildings and their static reliability could be assessed and their service life estimated, becomes most evident in the cases of building structure breakdowns. One of the promising non-destructive method groups, which are applied rather rarely, are the acoustic methods. The present paper studies potential applications of acoustic methods to the building element and structure diagnostics. In particular, following acoustic methods are dealt with:

The acoustic emission method: it detects and characterizes the process development. Its goal consists in „tapping“ the acoustic activity modes, the emission processes which take place in the material in question (plastic deformations, micro-crack and crack generation and propagation, crack pinching and opening, etc.). However, it detects, localizes and evaluates the defect activity in the course of their development only. Extensive laboratory experiment as well as subsequent *in situ* measurement results gained from selected bridge structure studies prove the acoustic emission method to be very well suited to the reinforced concrete element and structure evaluation from the viewpoint of the armature corrosive attack and its consequences.

Extensive laboratory experiment analyses have also revealed and confirmed [8] the correlation between the acoustic emission frequency spectrum components and the armature corrosive attack progress and its consequences. Thus gained knowledge has been used to establish a real bridge measurement and evaluation method, in which cases no information on the current status of the bridge structure is available and no comparison is practicable. The *in situ* measurements focused mainly on analyzing the frequency components related to the armature corrosion and its consequences. The measurements have shown that a long-time monitoring of the steel armature is needed in order to obtain a number of frequency spectra. These spectra are really able to capture the corrosion process progress and its consequences just in the way the laboratory specimen monitoring has proved to.

Based on thus obtained results, Technical specifications called "PK bridge diagnostic survey, monitoring procedures and concrete armature corrosion evaluation using the acoustic emission method" have been drafted.

The Impact-echo method is designed to „visualize“ a defect being present in the material structure. The existence of a defect is manifested through a change in elastic wave propagation and reflection processes. This is a qualitative method, searching for the defects being present, however, providing no quantitative piece of information regarding these defects. By means of the methods of this kind, existing structure defects and their variations at predefined time intervals can be monitored.

The application potential of this method has been studied in connection with the roof tile structural integrity and frost resistance evaluation. At the same time, the effect of two different manufacturing technologies (stamping 1988, drawing 2002) on the frost resistance was studied. The roof tiles were subject to accelerated degradation. They were cooled down to a temperature of -70°C in four consecutive cycles and the roof tile internal structure condition was monitored after each cycle. The dominant frequencies proved to shift upwards with the increase of the number of the degradation cycles applied. In the case of the stamped roof tiles, the frequency shift amounted to as much as several kHz and the number of significant frequency components increased at the same time, too. In the case of the drawn roof tiles, the frequency shift amounted to several tens of Hz only and the number of significant frequency components did not grow up. The correlation between the roof tile frequency spectra behaviour and their frost resistance was verified by measuring the roof tile physical properties, which are related to the frost resistance (water absorbing capacity, capillarity and porosity). From thus obtained results it is evident that the drawn tile frost resistance is very poor and the respective degradation process is very fast. On the other

hand, the drawn roof tiles give the results, which promise a very good frost resistance and only insignificant structural changes in the course of the accelerated degradation process.

The Impact-echo method was also applied to analyzing the cement-screed-shrinkage-induced volume changes of HURDIS slabs. Both single HURDIS slabs and sandwiched slabs have been studied. Structural integrity was damaged and cracks arose in all of thus manufactured sandwiches. The cracks in HURDIS slabs originating after their direct contact with a concrete layer is established are apparently due to the water content decrease, which in turn results in the concrete volume shrinking and the subsequent crack generation. The measurement results show that this method is very promising for detecting the above mentioned laboratory specimen defects, providing it is subject to some refinement. Based on the need for the first results being obtained in a rather short time, a statistically incomplete set of (good and defective) HURDIS slabs have only been delivered for the measurements. The results obtained are encouraging for the research continuation.

The same method was also applied to monitoring the corrosion progress of a steel armature and its consequences arising in atypical reinforced concrete beams, which had been subject to accelerated degradation. The measurement results obtained after the various corrosion cycles are completed show the frequency spectrum changes to correlate in time with the specimen internal structure changes, which are due to the incipient corrosion of the reinforced concrete armature. Frequency spectrum components being characteristic for the progressing corrosion and its consequences have been found to comply with [8]. The results were used to establishing the real-bridge-structure measurement methodology.

Non-linear spectroscopic methods are new diagnostic and defectoscopic methods, which have been designed on the basis of non-linear effect studies. The research and development of these methods and their practical application is – in view of the topic complexity and the exigency of the instrumentation to be procured or developed – in its initial stage currently. However, the knowledge attained until now shows these methods to be very promising for the material testing and defectoscopy in the near future.

An apparatus for single-exciting harmonic frequency measurements has been designed and put into practice based on our study of non-linear methods. While measuring the roof tiles, initial pieces of knowledge have been obtained regarding the method application to ceramic material structure diagnosis, suitable exciting frequencies have been identified and the measuring apparatus has been adjusted. Subsequent no-load and two various-mode thermal-load measurements of ceramic tiles have proved the non-linear acoustic spectroscopy to be highly sensitive to the specimen structural defect occurrence and easy to interpret as well. The different frequency spectra of intact tiles and those having been subject to two thermal loads in various modes have differed from each other. It is to be noted that the results of the Impact-echo measurements, having been carried out in parallel, showed to be extremely difficult to interpret as far as the identification of the various thermal load impacts is concerned.

It has been proved that combining the features of the non-linear acoustic spectroscopy with those of the acoustic emission and the Impact-echo methods has a potential to provide a better understanding of the material structure and properties, which is essential for the building structure safety evaluation and service life estimation.