

Určování materiálových charakteristik historických konstrukcí

Nestandardní laboratorní zkoušky malt

Miloš Drdáký

Mnoho budov a zejména výjimečné architektonické a umělecké památky jsou chráněny jako významné hmotné kulturní dědictví. Jejich zachování je podmíněno odolností proti vlivům a zatížením, které na ně působí po dlouhá staletí. Památky přitom nesmí dosáhnout stavu, který by mohl ohrozit jejich uživatele, návštěvníky nebo obdivovatele. Potřebná bezpečnost a spolehlivost stávajících konstrukcí a budov je posuzována podle kritérií technických norem a předpisů, které společnost přijímá pro zajištění přijatelné míry rizika. Aplikace těchto norem na posouzení budov vyžaduje znalost stavu a vlastností materiálů a konstrukcí, které tvoří substanci jejich hmotné existence. Vyšetřování a určování hodnot těchto vlastností na stávajících konstrukcích je u památek obvykle povoleno pouze za předpokladu vyloučení jejich poškození nebo možnosti zanedbatelného zásahu. I zde se však již dnes můžeme opřít o speciální normy. Normalizací v oblasti zkoušení historických materiálů a památek obecně se zabývá technický výbor CEN/TC 346 – Conservation of Cultural Heritage, který dosud zpracoval pouze zlomek potřebných norem, většinou obecnějšího charakteru.

Pro odběr vzorků taková obecná norma existuje – EN 16085 (srpen 2012) Conservation of cultural property – Methodology for sampling from materials of cultural property – General rules, tedy norma o obecných pravidlech pro odběr vzorků historického materiálu z kulturních památek. Účel této normy je popsán v úvodu a normu charakterizuje jako obecnou normu pro odběr vzorků materiálu, vytvářejícího kulturní památku za účelem jeho charakterizace během všech stadií konzervátorského procesu. Procedura odběru vzorků závisí na typu a podmínkách materiálu, který má být vzorkován, na specifickém studovaném případě a na zvolené metodě vyšetřování.

Vzorkování je vždy invazivní a nevratně poškozuje kulturní památku, jakkoliv málo. Odběr vzorků má být proto proveden pouze v silně zdůvodněných případech a v nejtěsnější konzultaci s osobami odpovědnými za památku a s osobami, které budou vzorky studovat. Konzultace musí vzít v úvahu, zda nelze stejnou informaci získat neinvazivním způsobem. Norma definuje vyšetřování jako získání informací nutných pro rozhodování o procesu konzervace (o konzervátorském záměru). Dále je pak definován vzorek jako část materiálu vyjmutá z kulturní památky pro vědecké vyšetřování, která vhodně materiál reprezentuje.

Minimální počet vzorků není definován, ale má být v souladu s plánem vyšetřování. Podobně je určena potřeba množství, které má být odebráno jako minimální, ale dostatečné. Množství závisí na typu památky, povaze materiálu a způsobu vědeckého vyšetřování, které má být použito. Relevantní evropská norma tedy nepředepisuje žádný konkrétní počet vzorků nebo množství materiálu ke zkoušení a to je podstatný rozdíl oproti technickým normám pro zkoušení materiálů a výrobků, např. střešní krytiny. Dalším významným rozdílem je i to, že zkouškami odebraného historického materiálu většinou nezískáme dostatek dat pro jejich statistické zpracování ve smyslu moderních norem.

Základními požadavky metodik pro šetrné průzkumy a zkoušení historických konstrukcí tedy jsou odběry materiálových vzorků o malých objemech a malých rozměrech. Pro zkoušení malt jsme obvykle dále omezeni tloušťkou malty ve spáře mezi kusovými stavivou, která umožňuje odběr vzorků o tloušťce okolo 20 mm. Takový rozměr neumožňuje vyrobít standardní zkušební tělesa. V případě dřevěných konstrukcí jsou přijatelné rozměry odebíraných vzorků ještě menší. Proto byla vyvinuta řada metod a technik překonávajících tyto překážky (např. Drdáký 2007).

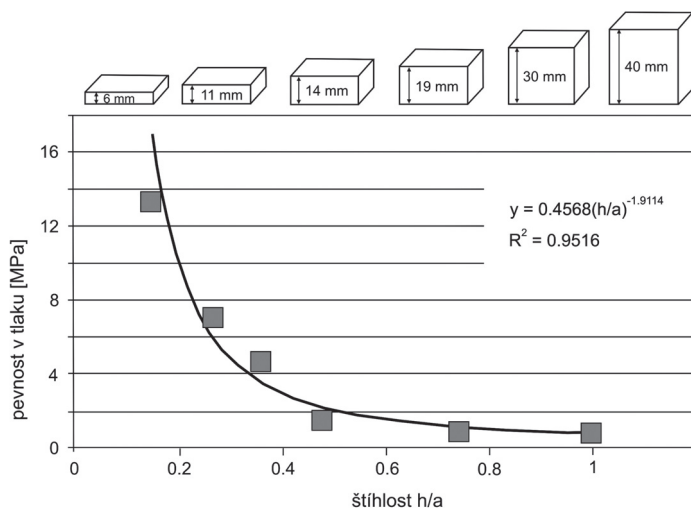
Zkoušení malt historických objektů je stále předmětem diskusí, neboť je zřejmé, že tradiční pojetí zkoušení malt dává v podstatě nesmyslné výsledky, prakticky nepoužitelné pro posouzení skutečné bezpečnosti, nebo naopak ohrožení historické konstrukce. Malta se, až na zanedbatelné výjimky, nevyskytuje ve zděné konstrukci v tloušťkách požadovaných pro výrobu zkušebních těles, není v těchto konstrukcích namáhána ani ohybem ani tlakem způsobem podobajícím se podmínkám zkoušky. Proto se objevují i požadavky na změnu metodiky zkoušení malt odebraných z historického zdiva a je snaha aplikovat zkušenosti z mechaniky zemin a hornin. To znamená např. zkoušet maltu v podmínkách trojosé napjatosti, což je samozřejmě mnohem náročnější a vyžaduje potřebné přístrojové vybavení. V této kapitole jsou popsány jednodušší přístupy.

Metodika nestandardních zkoušek je ovlivněna několika faktory. Jak již bylo zmíněno výše, především tím, že reálná velikost odebraného vzorku malty z historické konstrukce – zdiva – obvykle nedosahuje ani dvoucentimetrové tloušťky. Dále výroba tělíska pro zkoušku tlakem (vyřezání krychle) výrazně ovlivňuje vlastnosti vzorku, protože nevyhnutelně dojde k narušení povrchových vrstev a ke snížení pevnosti. Proto se v poslední době pro tlakové zkoušky dává přednost tělesům ve tvaru nepravidelného „koláče“ malty ze spáry zdiva, jehož tloušťka je obvykle vyrovnána sádrou na konstantní rozměr (např. Binda et al. 2004). Metodika zkoušení se neliší od klasických tlakových zkoušek, jenom vyhodnocení musí vzít v úvahu faktor štíhlosti (viz níže).

Na takovýchto nízkých vzorcích se obtížně měří modul pružnosti. To je i jeden z důvodů, proč byla rozvíjena i metodika zkoušení skutečné malty v ohybu. I zde však musíme řešit vzorky se stejnými problémy povrchového narušení. Nicméně, alespoň dva líce vzorku zde mohou zůstat bez obrábění a tudíž s intaktními vlastnostmi. Jedná se však vždy o plochy kontaktu mezi maltou a kusovým stavivem a tudíž o plochy technologicky ovlivněné jinak než základní materiál. Tento vliv obecně může zlepšit, ale i zhoršit vlastnosti malty. Zatím nebyl detailně studován. Velikost vzorku je však stále malá pro ohybovou zkoušku. Proto autoři navrhli a používají prodloužení vzorku jiným materiálem, tzv. protézování.

Zkoušení pevnosti historických malt v tlaku

Metodika zkoušení tlakové pevnosti historických malt představená v této kapitole je rozšířením staršího výzkumu zkoušení pevnosti cementových malt. Je známo již od 19. století, že velikost zkoušeného vzorku má významný vliv na měřenou pevnost a během doby byla navržena řada



OBRÁZEK 1: Tendence zvýšení naměřené tlakové pevnosti vápenných malt ve vztahu ke štíhlosti (Drdáček 2011)

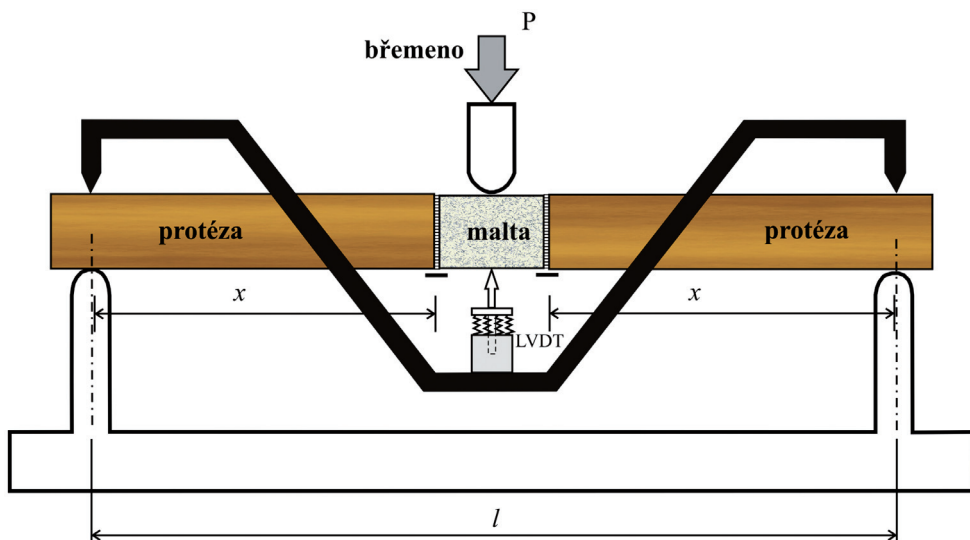
vzorců pro převod charakteristik získaných na nestandardních tělesech na hodnoty měřené při standardních zkouškách. Existuje bohatá bibliografie o vlivu faktoru velikosti pozorovaném při zkouškách malých betonových krychlí nebo válců (např. Del Viso et al. 2007). Na základě více než 80¹ vědeckých článků bylo pro nízké hranoly se čtvercovou podstavou zjištěno, že korekční funkce závisí zejména na délce hrany základny, na štíhlosti vzorku, neboli na poměru výšky k délce hrany základny i na pevnostní kvalitě malty. Maximální velikost zrna písku v maltě nehraje tak významnou roli jako jiné faktory, např. uspořádání zkoušky (excentricita a/nebo tlačné desky zkušebního stroje a jejich třecí charakteristiky – Schickert 1981, Konvalinka 2002). Pevnost změřená na nestandardních vzorcích je vyšší než pevnost z normových zkoušek, když se sníží štíhlost nebo délka hrany podstavy nebo pevnost malty. Nicméně veškerá starší literatura se odkazovala na cementové nebo betonové malty (Drdáček a Slížková 2008).

Pro vápenné historické malty byl vliv velikosti studován na maltách nízké pevnosti (okolo 0,365 MPa), která odpovídá pevnostem degradovaného historického materiálu. Převodní vzorec na pevnosti zkoušené standardním způsobem je uveden v rovnici (1):

$$f_c = f_e / (h/a)^{-1,9114} \quad (1)$$

kde f_c označuje vypočtenou tlakovou pevnost ekvivalentní standardní zkoušce, f_e je experimentálně zjištěná tlaková pevnost na nestandardním vzorku, h/a štíhlost vzorku. Vzorec platí pro vzorky s délkou hrany čtvercové podstavy a rovnou cca 40 mm a maltu nízké pevnosti [poměr složek ve směsi vzdušné vápno:písek byl pouze 1:9 (obj.)]. Na obr. 1 je rovnice porovnána s výsledky zkoušek. Při zkouškách nejsou tlačné čelisti ani styk mezi maltou a čelistí nijak upravovány z hlediska tření. Empirický vzorec (1) závisí na štíhlosti zkoušeného vzorku, na délce hrany jeho základny, na pevnosti malty, na typu zkušebního tělesa (hranol s podstavou rovnou tlačným deskám nebo větší „koláč“ nepravidelného tvaru, tlačný uvnitř plochy tlačnými deskami).

¹ Např. Séjourné 1914, Gaber 1934, Gaede 1962, Graf 1921, Schickert 1981, Horký a Dohnálek 1982.



OBRÁZEK 2: Zkouška ohybové pevnosti protézovaného vzorku malty třibodovým ohybem

Teoretické vysvětlení výše zmíněného efektu musí uvážit několik vlivů. Nejvýznamnějším je omezení příčné deformace na styku s tlačnými deskami, což vytváří v části objemu vzorku trojosou napjatost a tato část zaujímá větší procento objemu u menších vzorků. Působení malty a odhad mezního zatížení lze dobře modelovat numericky při popisu materiálového chování pružně plastickým Mohr-Coulombovým konstitutivním modelem (Drdáček et al. 2008).

Metoda je úspěšně používána pro analýzy domácích i zahraničních historických malt a vápenných betonů (Drdáček et al. 2013).

Zkoušení pevnosti historických malt v ohybu

Pro ohybové zkoušky je velmi obtížné získat dostatečně dlouhý vzorek malty, abychom mohli vyrobit zkušební trámeček. Proto byla vyvinuta metoda doplnění vzorku odebraného materiálu nastavujícími protézy na potřebnou délku, odpovídající podmínce Navierova předpokladu lineárního rozdělení napětí po průřezu při ohybu. Tento předpoklad je základem technické nauky o pružnosti a pevnosti materiálů a je použit při odvození matematických modelů potřebných pro vyhodnocení zkoušek. Při použití krátkého vzorku by byla měřená deformace navíc silně ovlivněna příspěvkem posouvající síly. Vhodným materiálem pro protézování malt je dřevo, neboť je dostatečně pevné, lehké, levné, dobře se obrábí a dobře se lepí. Celkové uspořádání zkoušky je znázorněno na obr. 2.

Pro vyhodnocení deformačních charakteristik ze zkoušek při třibodovém ohybu – modulu pružnosti v ohybu – se naměřené závislosti přepočtou podle vzorce (2):

$$E_2 = \frac{PIE_1(l^2 - 4x^2)}{32yE_1J - 4Plx^2} \quad (2)$$

kde P je působící síla, l rozpětí nosníku (vzorku), E_1 modul pružnosti dřevěných protézy, J moment setrvačnosti průřezu nosníku, x délka protézy = $0,5(l - \text{délka maltové části})$.

Vliv protézování je zanedbatelný podle výsledků zkoušek porovnávajících naměřené ohybové pevnosti na čistě maltových trámečcích s pevnostmi, zjištěnými na identickém materiálu při použití protézování. Rozlomená tělíska po zkoušce ohybem totiž byla použita pro testování vlivu protézování na možnost zkoušení ohybové pevnosti malt. Tělíska o velikosti cca $2 \times 2 \times 3$ cm a $3 \times 3 \times 4$ cm byla nastavena na délku potřebnou k ohybové zkoušce přilepením dřevěných protéz na oba konce a zatěžována čtyřbodovým ohybem. Poměr pevností protézovaného vzorku ku „standardnímu“, tj. celomaltovému dosahoval při zkouškách hodnot od 0,98 do 1,02, pokud došlo k porušení vzorku v jeho střední části (v nenarušené maltě). Při hodnocení výsledku je nutné poznamenat, že se protézované vzorky většinou porušují v těsné blízkosti dřevěné protézy nebo se od ní odtrhnou v tenké přechodové vrstvě malty. V takovém případě je zjištěná pevnost nižší a pohybuje se okolo 65–70 % pevnosti maltového vzorku pro tělesa o průřezu cca 2×2 cm, 80–100 % pro tělesa se stranami průřezu 3×3 cm. Jak již bylo řečeno, při výrobě protézovaného vzorku dochází k narušení oblasti malty v okolí řezné plochy lepeného konce. Technologie protézování tak vyžaduje úspěšně vyřešit problém zpevnění koncové oblasti a použití dostatečně pevného lepidla v kombinaci s přiměřeným typem zatěžování vzorku. Z tohoto hlediska je zřejmě v tomto případě tříbodový ohyb vhodnější než čtyřbodový, neboť méně namáhá oblast lepeného spoje. Osvědčilo se zesílit bandáží lepenou spáru mezi maltou a dřevěnou protézou (**obr. 3**). Zkušební tělesa se pak lámala v místě největšího namáhání trámečku (**obr. 4**). Metoda byla úspěšně použita i pro výzkum lomových charakteristik vápenných malt vyztužených organickými vlákny (Drdácký a Michoinová 2003). Obecně můžeme říci, že pro informativní hodnoty pevností historických malt odebraných konkrétních lokalit je metoda protézování dostatečně spolehlivá. Výhodou je zejména snadný odběr vzorků a objektivní výsledek.

Pro praktické aplikace zkoušení malt ze spár zdiva je vhodné poznamenat, že výsledek závisí na orientaci vzorku. Malta ve spáře je vždy ovlivněna na kontaktu s kusovým stavivem (cihlou, kamenem) a odebraný vzorek proto vykazuje vrstevnatou nestejnorodost. Zkušební těleso pro ohybové zkoušky by mělo být vyrobeno tak, že zatěžujeme kolmo k vrstevnaté struktuře. V opačném případě dochází k porušení oddělením vrstev a zkouška je neúspěšná.

Při použití nestandardních vzorků se dále musíme vyrovnat s tzv. faktorem velikosti, tj. vlivem rozměrů vzorku na jeho chování a naměřené mechanické vlastnosti. Tento faktor je zatím nejlépe prozkoumán pro vápenné malty a jejich ohybovou pevnost pilotní sérií zkoušek. Výsledky jsou uvedeny na **obr. 5**.

Ačkoliv výše uvedené zkoušky byly vzhledem k nízkému počtu zkušebních těles (minimálnímu pro základní vyhodnocení) jen orientační, je z grafu na **obr. 5** zřejmé, že zjištěná tendence poklesu ohybové pevnosti s růstem velikosti vzorku odpovídá známému „vlivu velikosti“, tj. na menších vzorcích zjišťujeme větší ohybové pevnosti a pro porovnání s normativními hodnotami musí být korigovány.

Je zřejmé, že velikost zrn neovlivňuje tendenci změny vlivu velikosti, přestože lehce ovlivňuje velikost pevnosti. Vliv velikosti pro vápennou maltu může být odhadnut podle vzorce (3):

$$f_b = f_e / (1 + C_{ssb} - C_{ssb} h/h_s) \quad (3)$$

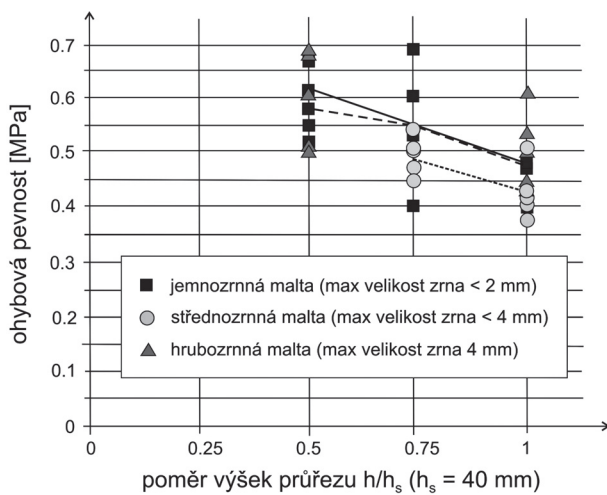
kde f_b označuje vypočtenou standardní ohybovou pevnost, f_e experimentálně dosaženou ohybovou pevnost, h/h_s poměr výšky průřezu ke standardní výšce průřezu $h_s = 40$ mm a korekční



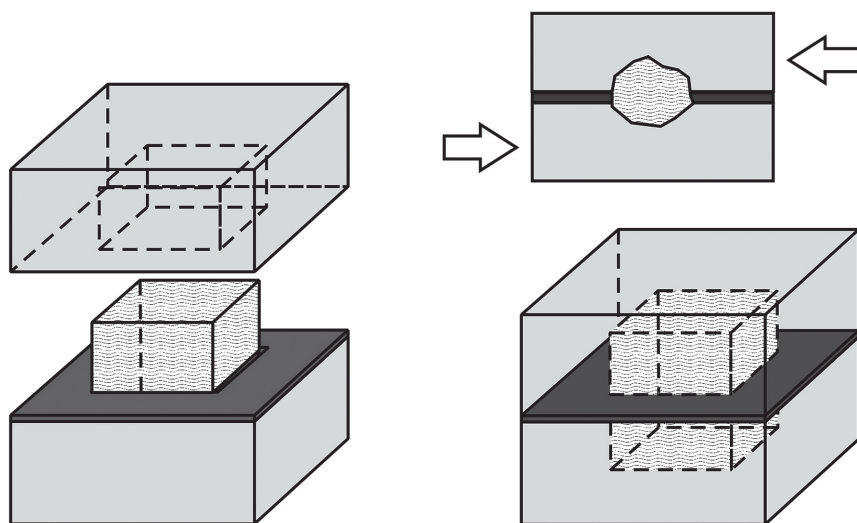
OBRÁZEK 3: Ukázka způsobu zesílení lepeného spoje podkladní bandáží



OBRÁZEK 4: Příklad zkoušky protézované malty vyztužené vlákny



OBRÁZEK 5: Vliv velikosti na hodnotu experimentálně zjištěné ohybové pevnosti malty



OBRÁZEK 6: Princip smykové zkoušky na nepravidelné hroudě malty – pro jednoduchost znázorněna rozložená skladba hranolem

koeficient pro ohyb malých vzorků C_{ssb} v průměru dosahuje 0,47 pro trámečky z vápenné malty o výšce 20-40 mm (měřené hodnoty C_{ssb} se měnily od 0,36 do 0,58 a zjevně závisí i na technologických parametrech, zejména na hutnění a ošetřování vzorků).

Zkoušení smykové pevnosti historických malt

Pro zjištění smykové pevnosti byla vyvinuta metodika založená na zkoušení smykové pevnosti zemin. Pro tuto zkoušku je vzorek malty konvexního tvaru zalit do bloků tuhého materiálu (např. do epoxidové pryskyřice) tak, že spojuje oba bloky přemostěním separační vrstvy mezi nimi. Separací vrstvou může být teflonová fólie, která zároveň zajišťuje posun bloků po sobě s velmi nízkým třením (**obr. 6**). Celý blok je vložen do smykového přístroje a zkoušen standardní zkouškou mechaniky zemin. Jako zkušební vzorky mohou být použity zlomené části trámečku po ohybové zkoušce.

Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

Použitá literatura

Binda, L., I. Papayianni, E. Toumbakari a R. Van Hees. Mechanical tests on mortars and assemblages. In: Groot, C., G. Ashall a J. Hughes (eds.). *Characterisation of old mortars with respect to their repair – final report of RILEM TC 167-COM*. [S. 1.]: RILEM publications SARL, 2004, 57-76. <https://doi.org/10.1617/2912143675.005>

- BS EN 16085:2012 Standard. *Conservation of Cultural property – Methodology for sampling from materials of cultural property – General rules*. London: British Standards Institution, 2012.
- Del Viso, J. R., J. R. Carmona a G. Ruiz. Experimental study on the influence of the shape and the size of the specimen on compression behaviour of high strength concrete. In: Gdoutos E. E. (ed.). *Experimental analysis of nano and engineering materials and structures*. Amsterdam: Springer, 2007, 189–190. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1_93
- Drdáček, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*. 2011, 5(4–5), 383–394. <https://doi.org/10.1080/15583051003717788>
- Drdáček, M. Testing of historic mortars on non-standard small size specimens. In: Binda, L., M. Drdáček a B. Kasal (eds.). *In-situ evaluation and non-destructive testing of historic wood and masonry structures*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2007, 130–139. ISBN 978-80-86246-36-9.
- Drdáček, M., F. Fratini, D. Frankeová a Z. Slížková. The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – A comprehensive assessment. *Construction and Building Materials*. 2013, 38, 1117–1128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>
- Drdáček, M., D. Mašín, M. D. Mekonone a Z. Slížková. Compression tests on nonstandard historic mortar specimen. In: *Book of Abstracts, HMC08 1st Historical Mortars Conference*. Lisbon: LNEC, 2008, 53. (+ CD ROM full paper).
- Drdáček, M. F. a D. Michoinová. Lime mortars with natural fibres. In: Brandt, A. M., V. C. Li a I. H. Marshall (eds.). *Brittle Matrix Composites 7*. Cambridge: Woodhead, 2003, 523–532. ISBN 978-1-85573-769-3.
- Drdáček, M. a Z. Slížková. Mechanical characteristics of historical mortars from tests on small-sample non-standard specimens. *Material Science and Applied Chemistry (Materiālzinātne un lietišķā ķīmija)*. 2008, 17, 20–29. ISSN 1407-7353.
- Horký, B. a J. Dohnálek. Influence of size and slenderness of nonstandard specimens on the compression strength of concrete and mortars. *Zpráva č. 512*. Praha: Stavební ústav ČVUT, 1982, 136.
- Konvalinka, P. Effects of loading conditions of concrete under uniaxial compression on its behavior. *CTU Reports*, 2002, 6(4), 82.
- Schickert, G. Formfaktoren der Betondruckfestigkeit. *Die Bautechnik*. 1981, 58(2), 52–57.