

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2020 / Vol. X / No. 2
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:

Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open access since 2020 available for free
on <https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/>
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:

Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:

fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2020
ISSN (Online) 2571-4384
ISBN (Print) 1805-0050

PROBLEMATIKA TESTOVÁNÍ INJEKTÁŽNÍCH MALT

Michal Novák

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Ing. Michal Novák, Ph.D., je absolvent Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, kde od roku 2010 působí na Ústavu chemické technologie restaurování památek. Zabývá se především stavebními materiály se zaměřením na anorganická pojiva. (novakm@vscht.cz)

Používání injektáží je standardním zásahem při snaze o záchranu původních povrchových vrstev stavebního objektu, u kterých došlo ke ztrátě soudržnosti s podkladem. Vzhledem k tomu, že injektážní malta je aplikována pod povrch, je zásah ze své podstaty prakticky nereverzibilní. Současně – ze stejných důvodů – je jeho průběh, a tedy i výsledná účinnost, obtížně kontrolovatelný. Proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost testování vlastností injektážních malt před jejich aplikací. V průběhu projektu NAKI II DG16P02M056 *Restaurování mozaik tzv. české mozaikářské školy ze skla a kamene* byla prováděna řada zkoušek injektážních malt s cílem posoudit jejich vhodnost pro upevnění mozaikových vrstev odtržených od podkladu. Pro testy byly využity jak komerční výrobky, tak malty připravené v laboratoři. Dosavadní zkušenosti ukazují, že testování injektážních malt přináší celou řadu problémů, které vyplývají jak z jejich specifických vlastností, tak ze způsobu použití. Cílem článku je poukázat na omezení některých doporučovaných testů vlastností injektážních malt a navrhnout další možnosti testování. Výsledky testů odvozených od normových zkoušek jsou do značné míry idealizované, neboť podmínky při testování se výrazně odlišují od reálných podmínek *in situ*. Při vyhodnocování vlastností injektážních malt je tedy nezbytný kritický přístup. Je-li to možné, je vhodné pro přesnější odhad vlastností provést zkoušky, které nejsou standardizované, ale lépe odpovídají skutečným podmínkám v místě aplikace. **Klíčová slova:** injektážní malty; testování; upevňování mozaiky; reálné podmínky

PROBLEMS OF INJECTION GROUTS TESTING

The use of injection grouts is a standard procedure in the effort to save the original architectural surfaces that have lost their cohesion with the base material. Because the injection grout is applied under the surface, the intervention is inherently non-reversible. At the same time – and for the same reasons – its course, and thus the resulting efficiency is difficult to control. Therefore, special attention should be paid to the testing of injection grouts properties prior to their application. During the NAKI II project DG16P02M056 *Conservation of Glass and Stone Mosaics of the Czech Mosaics School*, a series of tests of injection grouts was carried out, in order to assess their suitability for fixing mosaic layers separated from the substrate. Both commercial products and laboratory-prepared grouts were used for the tests. The existing experience has shown that the testing of injection grouts raises several problems that arise both from their specific properties and from their use. The aim of the paper is to point out the limitations of some recommended tests of injection grouts properties and to suggest further testing possibilities. The test results derived from standardized tests are largely idealized, as the test conditions differ significantly from the real conditions *in situ*. A critical approach is therefore necessary when evaluating the injection grouts properties. Where possible, non-standardized tests that match better the actual application conditions should be performed to estimate the injection grouts properties.

Key words: injection grouts; testing; strengthening of mosaics; real conditions

Přestože jsou injektáže široce rozšířeným restaurátorským zásahem, počet dostupných novějších souhrnných publikací je relativně omezený. Pravděpodobně nejucelenějším textem, který se zabývá testováním injektážních malt pro památkové objekty, je tak zřejmě i v současnosti publikace *Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces* vydaná The Getty Conservation Institute [Biçer-Şimşir, 2013]. Tato publikace shrnuje obecné požadavky na injektážní malty, dále popisuje laboratorní zkoušky a zjednodušené zkoušky v terénu. Doporučené laboratorní zkoušky jsou převážně odvozeny od normových zkoušek určených původně pro jiné typy materiálů (běžné malty, cement, epoxidové pryskyřice aj.). Dřívější článek *Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces* [Biçer-Şimşir, 2009], na jehož vzniku se podílely stejné autorky, pak přináší souhrn teoretických znalostí o injektážních maltách používaných pro restaurování povrchových vrstev objektů. Článek popisuje jednotlivé složky injektážních malt, dále vliv běžně používaných aditiv a problematiku testování. V závěru autorky konstatují, že jedním ze zásadních problémů testování injektážních malt je absence jednotné metodiky. To vyplývá mimo jiné z často zcela protichůdných požadavků na jejich vlastnosti [Padovnik, 2016]. Z prací publikovaných v České republice během posledních let přináší širší pohled na injektážní malty teoretická část diplomové práce *Injektážně malty modifikované lahčnými plnivami na vyplnění dutín vo vápenných omietkach* [Rajtárová, 2018]. Experimentální část této práce popisuje řadu zkoušek realizovaných jak na komerčních směsích, které lze využít pro přípravu malt vhodných pro injektáže větších objemů, tak na maltách připravených v laboratoři.

Níže uvedené zkoušky se zabývají vlastnostmi injektážních malt, které je možné z hlediska efektivity restaurátorského zásahu označit za klíčové. Ačkoliv jsou v článku uváděny konkrétní výsledky některých zkoušek, je třeba je v tomto případě považovat pouze za ilustrační.

EXPERIMENT

Poznatky popsané v článku byly získány v průběhu laboratorních zkoušek komerčních směsí pro přípravu injektážních malt (Tab. 1) a malty připravené v laboratoři, dále označené jako RM. Složení této malty rámcově vychází z receptury používané restaurátory z Fakulty restaurování Univerzity Pardubice v rámci projektu NAKI, jehož je tento výzkum součástí. Výchozí složení malty RM uvádí Tab. 2. U komerčních směsí bylo pro přípravu malty vždy použito nejmenší množství vody z rozsahu uvedeného v technickém listu výrobce.

Tabulka 1 Informace o testovaných komerčních směsích na přípravu injektážních malt převzaté ze stránek výrobce (Tecno Edile Toscana s.r.l.¹, AQUA obnova staveb, s.r.o.²) / Information about tested commercial mixtures for the preparation of injection grouts taken from the producer web pages (Tecno Edile Toscana s.r.l.¹, AQUA obnova staveb, s.r.o.²)

Název/označení (v závorce alternativní označení) – výrobce	Účel	Doporučené množství vody na 100 g suché směsi
Ledan TB1 ICR (D1) – Tecno Edile Toscana s.r.l.	upevnění uvolněných vrstev s nástěnnou malbou k podkladu, injektáž mikrotrhlin	předzpevnění 150 ml, upevnění vrstvy k podkladu 80 ml
Ledan TA1 (D2) – Tecno Edile Toscana s.r.l.	strukturní zpevnění zdiva v blízkosti fresek či jiných cenných povrchových úprav, vysoká tekutost	předzpevnění 160 ml, strukturní zpevnění 80 ml
Ledan TC1 Plus (D3) – Tecno Edile Toscana s.r.l.	strukturní zpevnění suchého zdiva bez nástěnných maleb nebo mozaik, nižší mechanická odolnost	strukturní zpevnění 160 ml (dříve uváděno: předzpevnění 160 ml, upevnění vrstvy k podkladu 90 ml)
Vapo Injekt – AQUA obnova staveb, s.r.o.	vyplňování úzkých trhlin a dutin, přitmělení uvolněných vrstviček vápenných nátěrů, štuků	40 ml (výrobce udává poměr suchá směs : voda jako 3 : 1; množství vody bylo určeno na základě změřené sypané hmotnosti materiálu)

K přípravě injektážní malty RM bylo použito přirozené hydraulické vápno Calcidur NHL 2 (výrobce Zement-und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co. KG³), mramorová moučka Omyacarb VA 15 (dodavatel Aqua obnova staveb, s.r.o.²), derivát celulózy Tylose MH 300 (methyl hydroxyethylcelulóza, dodavatel Ceiba, s.r.o.⁴) a akrylátová disperze K9 (dodavatel CSC stavby, s.r.o.⁵). Kromě výchozí malty obsahující 0,25 hm. % Tylose MH 300 (vztaženo na celkovou hmotnost malty) byly testovány i malty s odlišným obsahem derivátu celulózy. Při jejich přípravě bylo použito množství roztoku derivátu odpovídající požadovanému obsahu a současně bylo patřičně upraveno množství přidávané vody.

Tabulka 2 Složení výchozí maltové směsi RM připravené v laboratoři
Composition of the original injection grout RM prepared in the laboratory

Složka	NHL 2	Mramorová moučka	Voda	1% roztok Tylose MH 300	5% disperze K9
Množství [g]	21	40	10	25	4

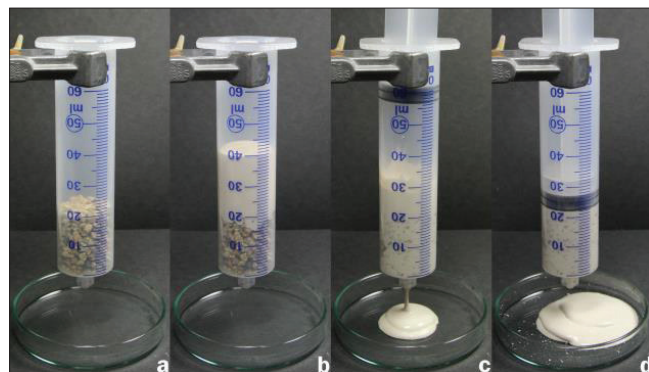
Roztok Tylose MH 300 byl připraven dispergací prášku v horké vodě a následným ochlazením. Tento postup využívá nerozpustnosti neionických derivátů celulózy v horké vodě. Prášek je nejprve dispergován v horké vodě tak, aby došlo k dokonalému smáčení všech částic, následně je ochlazen, čímž dojde k rozpuštění derivátu. Pokud je roztok připravován rozpouštěním ve studené vodě, dochází ke vzniku shluků, které mají na svém povrchu gelovou vrstvu bránící dalšímu rozpouštění částic uvnitř shluku, proto je tento postup nevhodný [DOW[®], 2013].

Pro některé zkoušky byla použita zkušební tělíska připravená z malty na bázi vzdušného vápna, plnivou tvoří čistý křemičitý písek. Složení malty je převzato z práce [Pechová, 2018]. Malta byla připravena ručním mícháním, naplněna do forem, které byly následně překryty vlhkou textilií. Po počátečním zатуhnutí (cca 4 dny) byly vzorky odformovány. Aby došlo k prokarbonatování vápenné malty, byly vzorky po dobu dvou měsíců pravidelně třikrát týdně ošetřovány vodou a následně ponechány k vyschnutí.

INJEKTOVATELNOST

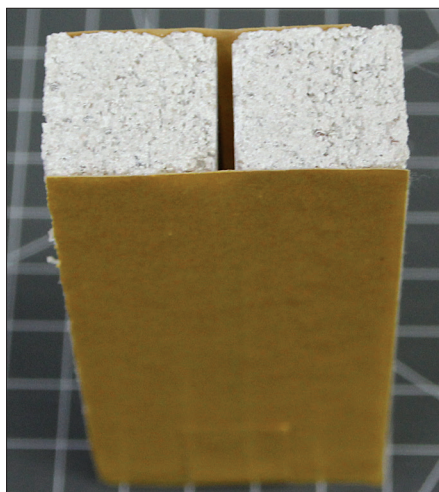
Publikace [Biçer-Şimşir, 2013] doporučuje testovat injektovatelnost malty postupem, při kterém je malta pomocí zvýšeného tlaku injektována do válce naplněného drcenou cihlou či travertinem. Zkouška je odvozena od stanovení injektovatelnosti při sanaci betonových konstrukcí [ČSN EN 1771, 2005]. Výsledkem je křivka závislosti injektovaného objemu (resp. výšky materiálu) na čase. Tato zkouška je poměrně náročná na provedení, především z hlediska nezbytného vybavení laboratoře. Zkoušku lze provést zjednodušeným způsobem, při kterém je injektážní stříkačka naplněna drcenou cihlou či travertinem, poté injektážní maltou a následně je malta pomocí pístu protlačována vrstvou drčeného materiálu (viz Obr. 1). Při této variantě je subjektivně vyhodnocována obtížnost průchodu malty drceným materiálem. Obě

dvě varianty vyžadují přípravu drčeného materiálu s vhodnou granulometrií (velikost částic 2–4 mm) a lze je provádět jak se suchým, tak s předvlhčeným materiálem. Varianta využívající písek (postup dle výše uvedené normy) není na testování injektážních malt pro restaurování vhodná, protože zanedbává nasákavost materiálu v okolí injektovaného defektu [Biçer-Şimşir, 2013]. Zkouška poskytuje výsledky využitelné k relativnímu vyhodnocení injektovatelnosti různých malt, například při zjišťování vlivu příměsí. Vzhledem ke zcela odlišné geometrii defektů (pórů – mezer mezi zrny drčeného materiálu) však nelze z výsledků odvodit chování testovaných injektážních malt v praxi.

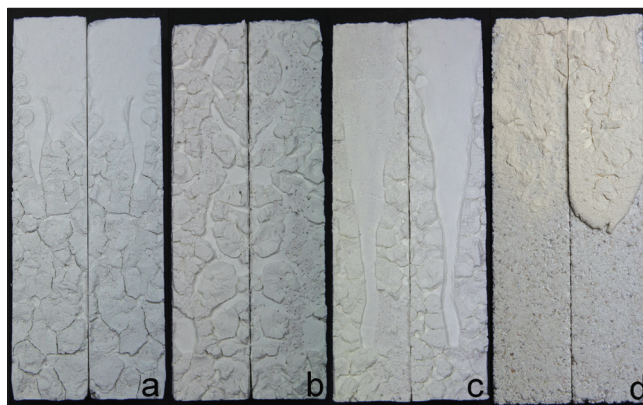


Obr. 1 Zjednodušená zkouška injektovatelnosti: a) injektážní stříkačka (60 ml) naplněná 20 ml zrnitého materiálu, b) nalití 20 ml testované injektážní malty, c) protlačování injektážní malty materiálem, d) ukončení testu (zde s výsledkem velmi dobré injektovatelnosti) / Simplified injectability test: a) syringe (60 ml) filled with 20 ml of granular material, b) addition of 20 ml of tested injection grout, c) injection of mortar through the material, d) end of test (here with the result: very good injectability)

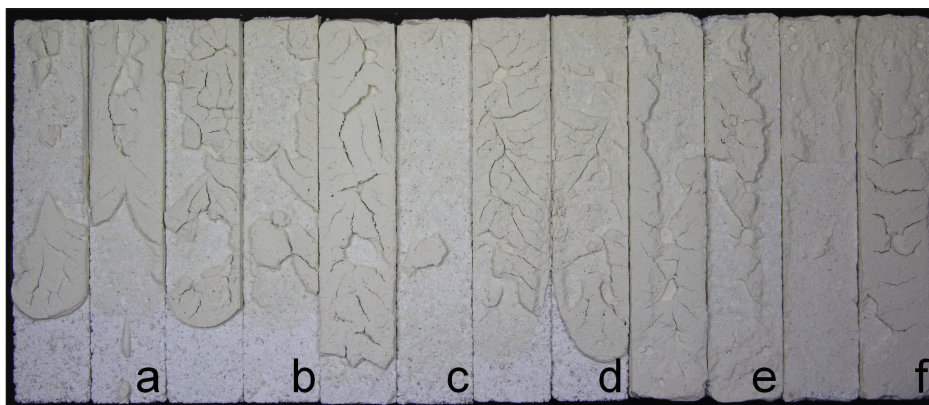
Na základě laboratorních testů se našemu pracovišti osvědčilo odlišné provedení zkoušky injektovatelnosti. Jsou při něm použity vzorky ve tvaru hranolů o rozměrech 2 × 2 × 10 cm připravené z vápenné malty. Pomocí lepicí pásky jsou k sobě vzorky slepeny tak, že je mezi nimi vytvořena štěrbina o požadované šířce (Obr. 2). Do takto vytvořené štěrby je následně pomocí injektážní stříkačky s jehlou injektována malta. Po čtyřech dnech je lepicí páska odstraněna a je vyhodnocena injektovatelnost. Lze hodnotit hloubku, do jaké malta zatekla, pevnost spoje a po oddělení i chování injektážní malty v trhlině, tedy například vznik trhlin v důsledku smrštění způsobeného odsátím vody okolním materiálem či vysycháním. Podobné uspořádání pro zkoušku injektovatelnosti lze nalézt také v práci [Rajtárová, 2018], kde autorka injektuje lehčené malty do zužující se štěrby vytvořené dvěma cihlovými hranoly.



Obr. 2 Vzorek pro zkoušku injektovatelnosti / Sample for the injectability test



Obr. 3 Výsledky zkoušky injektovatelnosti malt připravených z komerčních směsí do suché štěrbině a) Ledan TB1, b) Ledan TA1, c) Ledan TC1, d) Vapo Injekt / Results of the injectability tests of grouts prepared from commercial mixtures into dry crack a) Ledan TB1, b) Ledan TA1, c) Ledan TC1, d) Vapo Injekt



Obr. 4 Výsledky zkoušky injektovatelnosti malt RM s různým obsahem Tylose MH 300 a) 0 hm. %, b) 0,05 hm. %, c) 0,10 hm. %, d) 0,15 hm. %, e) 0,20 hm. %, f) 0,25 hm. % / Results of the injectability tests of RM grouts with different content of Tylose MH 300 a) 0 wt. %, b) 0.05 wt. %, c) 0.10 wt. %, d) 0.15 wt. %, e) 0.20 wt. %, f) 0.25 wt. %

Obr. 3 ukazuje vzhled vzorků po zkoušce injektovatelnosti malt připravených z komerčních směsí. Injektování se provádělo do štěrbin o šířce 2 mm, maltová tělesa nebyla předvlhčena. U komerčních směsí Ledan aplikaci bez předvlhčení výrobce výslovně povoluje a uvádí jako jedno z pozitiv produktů. Naopak u komerční směsí Vapo Injekt je výrobcem uvedeno, že injektovaný defekt má být předvlhčen. V případě tohoto testu tedy aplikace nebyla provedena v souladu s technickým listem, což se na chování malty projevuje. Výsledek však dobře ilustruje možné chování malty během injektáže, není-li injektovaný defekt dostatečně předvlhčený.

Chování jednotlivých injektážních malt je značně odlišné. Malta připravená ze směsí Ledan TB1 a Ledan TC1 vytvořila v horní části štěrbinu staženinu a současně při vysychání došlo ke vzniku sítě prasklin (Obr. 3a, 3c). Malta připravená ze směsí Ledan TA1 vytvořila síťoví menších staženin (Obr. 3b). Přes tyto rozdíly byla pevnost všech injektážních maltami ze směsí Ledan podobná; abychom oddělili zkušební tělesa, stačilo vyvinout mírný tlak. U malty připravené ze směsí Vapo Injekt se výrazně projevil nižší doporučený obsah vody a současně i negativní vliv suchého podkladu. V maltě nedošlo k vytvoření staženin a i přes výrazně nižší styčnou plochu bylo potřeba k oddělení obou zkušebních těles vyvinout značnou sílu (Obr. 3d).

Obr. 4 ukazuje vzhled vzorků po zkoušce injektovatelnosti malt RM s různým obsahem Tylose MH 300. U tohoto testu byla štěrbina postupně 2× naplněna po okraj vodou a injektáž byla provedena 5 minut po druhém naplnění.

Zkouška ukazuje, že obsah derivátu celulózy má na injektovatelnost malty určitý vliv. To je pravděpodobně způsobeno jeho schopností zvýšit zádrž vody v maltě [Bülichen, 2012]. U všech vzorků došlo ke vzniku sítě trhlin způsobených smrštěním vysychající malty. K oddělení testovacích těles bylo potřeba vyvinout větší sílu, přes přítomnost prasklin je tedy injektáž poměrně pevná. K porušení došlo převážně na rozhraní mezi injektáží a zkušebním tělesem, případně ve hmotě injektáže.

DOBA TUHNUTÍ

Pro určení doby tuhnutí je doporučována zkouška pomocí Vicatova přístroje. Zkouška spočívá v měření hloubky penetrace zatížené ocelové jehly o průřezu 1 mm² do malty umístěné ve zkušebním prstenci o výšce 40 mm. Hloubka penetrace je v pravidelných intervalech zaznamenávána. Jako počátek tuhnutí je udáván okamžik, kdy jehla pronikne do hloubky 3–5 mm nad podložku tvořící dno (tj. 37–35 mm od povrchu malty). Jako konec tuhnutí je udáván okamžik, kdy jehla pronikne do hloubky pouze 0,5 mm od povrchu malty. V čase mezi prováděním jednotlivých měření mají být formy s testovanou injektážní maltou uchovávány při relativní vlhkosti 95 % [Biçer-Şimşir, 2013; ČSN EN 196-3, 2017].

Zásadním problémem této zkoušky je fakt, že zanedbává vliv tuhnutí injektážních malt (ve smyslu ztráty plasticity) v důsledku odsávání vody okolním materiálem. Zkouška tedy poskytuje pouze informaci o tom, jakým způsobem by malta tuhla za ideálních podmínek. Tab. 3 udává doby počátku tuhnutí vybraných testovaných malt.

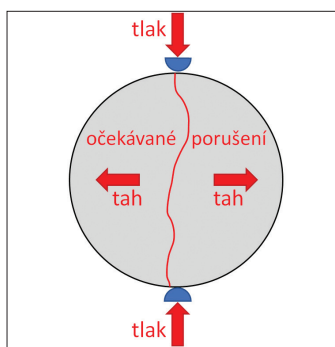
Tabulka 3 Doba počátku tuhnutí vybraných testovaných malt. Hodnoty označené * jsou převzaty z práce [Balíková, 2019] / Initial setting times of selected tested grouts. Values marked with * are taken from [Balíková, 2019]

Malta	Počátek tuhnutí [h]	Počátek tuhnutí dle údajů výrobce [h]
Ledan TB1 (D1)	100*	24
Ledan TA1 (D2)	80*	18
Ledan TC1 (D3)	80*	6
Vapo Injekt	90*	neudává
RM 0 % MH300	192	-
RM 0,05 % MH300	236	-
RM 0,25 % MH300 – výchozí	365*	-

Z výsledků je zřejmé, že naměřené doby počátku tuhnutí malt připravených z komerčních směsí Ledan se výrazně liší od údajů uváděných výrobcem v technických listech. Výrobce však neuvádí metodiku testování, která může mít na výsledné hodnoty zásadní vliv. U malty RM se významně projevil vliv obsahu derivátu celulózy na dobu tuhnutí. Je zřejmé, že i poměrně malé množství Tylose MH 300 dobu tuhnutí výrazně prodlužuje. Tento efekt derivátů celulózy je známý a je zmíněn například v práci [Bülichen, 2012].

PEVNOST INJEKTÁŽNÍ MALTY

Publikace [Biçer-Şimşir, 2013] doporučuje testovat pevnost injektážních malt pomocí zkoušky pevnosti v příčném tahu [ČSN EN 12390-6, 2010]. Při ní jsou mechanicky do porušení namáhány vzorky válcového průřezu. V důsledku rozložení působících sil dochází k porušení vzorku nikoliv tlakem, ale tahem (Obr. 5).

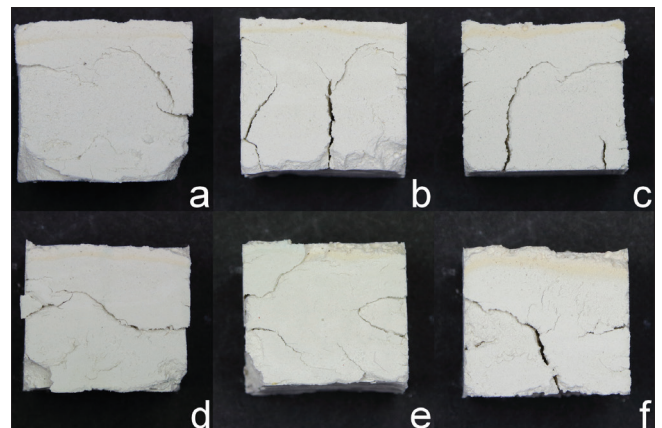


Obr. 5 Rozložení sil ve vzorku během zkoušky pevnosti v příčném tahu / Distribution of forces in the sample during splitting tensile strength test

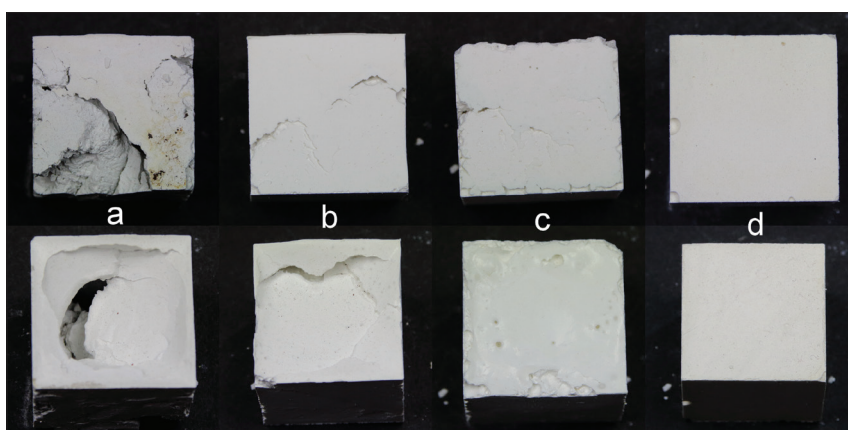
I tato zkouška je primárně pro testování cementu, resp. betonu. Publikace [Biçer-Şimşir, 2013] doporučena vzorky připravovat tak, že je injektážní maltou naplněna plastová trubka, jež je následně neprodyšně uzavřena. Po době nezbytné k vyzrání malty (minimálně dva měsíce) je trubka otevřena a připravený maltový váleček se za sucha nařeže na menší vzorky, které jsou podrobeny zkoušce výše uvedeným způsobem. Stejně jako u zkoušky doby tuhnutí je zanedbán vliv odsávání vody okolním materiálem. Zjištěná pevnost malt tak opět odpovídá tuhnutí malty za ideálních podmínek, tedy při udržení malty ve vlhkém stavu tak dlouho, aby mohla proběhnout hydratace hydraulického pojiva. Současně zkouška nevytvrdí o pevnosti spoje injektážní malty – injektovaný materiál. Jde opět spíše o zkoušku vhodnou pro relativní porovnávání různých typů injektážních malt.

Příprava vzorků ke zkouškám pevnosti je velmi obtížná, neboť ve větším objemu malty při tuhnutí vykazují odlišné chování, než jaké lze předpokládat v průběhu samotné injektáže. To demonstrují Obr. 6 a 7 dokumentující vzhled vzorků určených pro zkoušky pevnosti v tlaku. Vzorky o rozměrech 2 × 2 × 2 cm byly připravovány do kovových forem, které byly po naplnění na dobu čtyř dní překryty polymerní fólií, aby se zamezilo odpařování vody. Po jejím sejmutí byly vzorky odformovány a ponechány k vyschnutí. U všech maltových vzorků připravených z komerčních směsí Ledan došlo k rozpadu. To lze přičíst velmi vysokému obsahu vody v maltách – i při velmi pozvolném odparu dochází k výraznému smršťování materiálu, a tím ke vzniku trhlin. Malta připravená z komerční směsí Vapo Injekt obsahuje nejméně vody (40 g na 100 g suché směsi), míra smrštění je tak významně nižší.

U malt RM s různým obsahem Tylose MH 300 je situace obdobná. Přes nižší množství vody v maltě došlo k popraskání všech vzorků. Mezi vzorky malt obsahující různé množství derivátu celulózy Tylose MH 300 nejsou patrné žádné rozdíly (Obr. 7).



Obr. 7 Vzorky malt RM s různým obsahem Tylose MH 300 a) 0 hm. %, b) 0,05 hm. %, c) 0,10 hm. %, d) 0,15 hm. %, e) 0,20 hm. %, f) 0,25 hm. %. Pohled z boku / RM grout samples with different content of Tylose MH 300 a) 0 wt. %, b) 0.05 wt. %, c) 0.10 wt. %, d) 0.15 wt. %, e) 0.20 wt. %, f) 0.25 wt. %. Side view

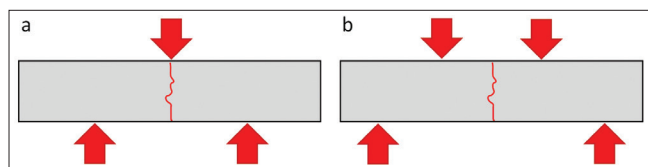


Obr. 6 Vzorky malt připravených z komerčních směsí a) Ledan TB1, b) Ledan TA1, c) Ledan TC1, d) Vapo Injekt. Horní řada: pohled z boku, spodní řada: pohled shora / Grout samples prepared from commercial mixtures a) Ledan TB1, b) Ledan TA1, c) Ledan TC1, d) Vapo Injekt. Top row: side view, bottom row: top view

PEVNOST SPOJE

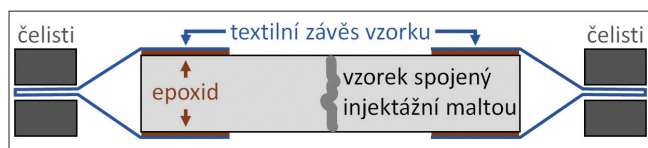
Ačkoliv je pevnost spoje mezi injektážní maltou a povrchem injektovaného defektu jednou z nejpodstatnějších vlastností, publikace [Biçer-Şimşir, 2013] zařazuje zkoušku pevnosti spoje mezi zkoušky dodatkové. Navrhovaný test zkouší adhezi malty k povrchu hladkých kamenných vzorků zatěžovaných ve smyku. Metoda je náročná jak na přípravu vzorků (nutnost přesného nařezání kamene), tak na následné provedení samotné zkoušky pevnosti ve smyku (vyžaduje použití speciálního držáku vzorků). Cílem zkoušky je určit, zda v případě mechanického namáhání v okolí injektáže nedojde přednostně k porušení původního (historického) materiálu.

Vzhledem k tomu, že modelovat přesné působení sil při namáhání spoje vytvořeného injektáží je nereálné, je možné na zkoušky volit i jednodušší uspořádání. Jednou z možných variant je zkouška pevnosti spoje v tahu za ohybu. Vzorky lze připravit slepením čel dvou zkušebních maltových těles ($2 \times 2 \times 10$ cm) pomocí injektážní malty podobným postupem jako při výše popsané zkoušce injektovatelnosti. Vhodnější je však zkušební těleso přelomit (buď manuálně, nebo pomocí zkušebního stroje) a štěrbinu vytvořit výše odkazovaným způsobem v místě lomové plochy. Charakter vzniklé štěrbině tak lépe odpovídá reálné situaci. K následnému testování je vhodnější použít čtyřbodový ohyb, při kterém není břemenem vzorek zatěžován přímo v místě spoje nebo v jeho těsné blízkosti (Obr. 8).

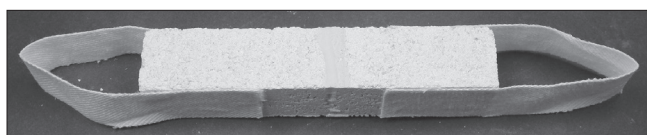


Obr. 8 Působení sil při testech pevnosti v tahu za ohybu a očekávané místo porušení vzorku a) trojbodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb
Forces applied during tensile strength test and expected localisation of failure a) three point test, b) four point test

Další možností je testovat pevnost spoje v prostém tahu. Vzhledem k relativně nízké pevnosti spoje může docházet k jeho porušení již při upevňování vzorku do čelistí zkušebního stroje. V těchto případech se osvědčilo použití pásek z pevné tkaniny, které jsou pomocí dvousložkové epoxidové pryskyřice přilepeny k bokům vzorku. Za tyto pásky je následně vzorek upevněn do čelistí zkušebního stroje (Obr. 9, Obr. 10).



Obr. 9 Schéma vzorku na zkoušku pevnosti v prostém tahu / Sample scheme for direct tensile strength test



Obr. 10 Vzorek určený na zkoušku pevnosti v prostém tahu / Sample for direct tensile strength test

DISKUSE A VYHODNOCENÍ

Řada zkoušek doporučených na zkoumání či ověřování vlastností injektážních malt je odvozena od normových zkoušek k testování cementů či betonů nebo zcela odlišných materiálů (epoxidové pryskyřice aj.). Podmínky, za jakých je normová zkouška prováděna, zpravidla neodpovídají reálné situaci. Lze však předpokládat, že vyhovující výsledek normové zkoušky znamená určité (vyhovující) chování materiálu v reálných podmínkách. Pokud jsou podmínky normové zkoušky zásadním způsobem upraveny (například záměnou písku s granulometrií podle normy za drcený porézni materiál v případě zkoušky injektovatelnosti), nelze jednoznačně určit, jakým způsobem je třeba upravit hodnotící kritéria, aby vyhovující výsledek zkoušky odpovídal požadovaným vlastnostem materiálu v reálných podmínkách. Z tohoto důvodu je vhodné testy vzniklé úpravou normových zkoušek považovat spíše za srovnávací, nikoliv aplikační.

Jako první z testů je vhodné provádět zkoušku injektovatelnosti. Není-li malta dobře injektovatelná ani do simulované štěrbině, která má optimální geometrii, lze očekávat, že její prostupnost reálným systémem defektů bude ještě horší. Je-li to možné, je vhodné, aby se uspořádání testu maximálně blížilo reálné situaci, především z hlediska očekávané nasákavosti materiálu a šířky (velikosti) štěrbině. Série testů s různou šířkou štěrbin a různou mírou provlhčení injektovaného materiálu může poskytnout rámcovou představu o chování injektážní malty v různých částech defektu.

Měření doby tuhnutí je z hlediska aplikace spíše doplňkovou zkouškou. Je-li však naměřená doba tuhnutí malty příliš dlouhá, v praxi dojde v injektovaném defektu dříve k jejímu vyschnutí než ke ztuhnutí a ztvrdnutí. Malta tak nezíská požadované mechanické vlastnosti. V extrémním případě vyschlá malta vytváří pouze výplň defektů, aniž by významně zvyšovala adhezi odtržené povrchové vrstvy k podkladu [Peroni, 1981; Penelis, 2020]. Tuto zkoušku je proto vhodné provádět zejména v případě, že jsou do injektážní malty přidávány příměsi, u kterých lze vliv na dobu tuhnutí předpokládat.

Příprava vzorků pro mechanické zkoušky se ukázala jako velmi obtížná a vzorky připravené během našeho výzkumu provedení zkoušek nemožnými. Obtíže při přípravě objemnějších vzorků pro tyto testy popisuje i práce [Biçer-Şimşir, 2009]. Příčinou je rozdíl v chování injektážních malt ve větším objemu a v injektovaných defektech. Vzhledem k tomu, že podmínky při přípravě vzorků jsou významně odlišné od reálné situace, jsou běžné mechanické zkoušky vhodné spíše jako zkoušky pro vzájemné porovnání různých typů malt.

Zkouška pevnosti spoje má pro hodnocení vlastností injektážních malt mnohem větší vypovídací hodnotu než zkouška pevnosti samotné injektážní malty. Přípravu vzorků lze při vhodném uspořádání spojit se zkouškou injektovatelnosti a získat tak informace o pevnosti spoje v různých částech injektovaného defektu (například v závislosti na šířce štěrbině). Tento postup je uplatněn například i v práci [Rajtářová, 2018].

ZÁVĚR

Injektážní malty využívané k restaurátorským zásahům na historických objektech jsou velmi specifickým materiálem. Pro zkoušky předcházející konkrétní aplikaci je vhodné volit takové uspořádání, které se podmínkami co nejvíce blíží konkrétní aplikaci. Testy injektážních malt rámcově vycházející z normových zkoušek jsou vhodné především ve fázi výzkumu či pro porovnání s výsledky jiných pracovišť. Při vyhodnocování vlastností injektážních malt na základě těchto zkoušek je však třeba brát v potaz, že naměřené hodnoty jsou do značné míry idealizované a od skutečných vlastností malty v místě injektáže se mohou významně lišit.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla v rámci projektu NAKI II (DG16P02M056) podpořeného prostředky Ministerstva kultury ČR.

POZNÁMKY

¹ <https://www.tecnoediletoscana.com/ledan>

² <https://www.aquabarta.cz/>

³ https://www.zkw-otterbein.de/produkte/alle_artikel/calcidur-nhl-zwei-detail

⁴ <https://eshop.ceiba.cz/>

⁵ <https://www.krustashop.cz/>

LITERATURA

- BALÍKOVÁ, K. *Vliv vodního součinitele na vlastnosti injektážních malt*. Praha, 2019. Diplomová práce. VŠCHT Praha, Fakulta chemické technologie.
- BIÇER-ŞİMŞİR, B – GRIFFIN, I. – PALAZZO-BERTHOLON, B. – RAINER, L. Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces. *Studies in Conservation*. 2009, 54(sup1), s. 3–17.
- BIÇER-ŞİMŞİR, B. – RAINER, L. Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces. Los Angeles (USA): The Getty Conservation Institute, 2013. ISBN 978-1-937433-15-4.
- BÜLICHEN, D. – KAINZ, J. – PLANK, J. Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose (MHEC) as water retention agent. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42, s. 953–959.
- ČSN EN 12390-6 (731302). *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6:*

Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- ČSN EN 1771. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení injektovatelnosti a zkouška v příčném tahu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- ČSN EN 196-3 (722100). *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- DOW®. How to Prepare Aqueous Solutions of METHOCEL™ Cellulose Ethers. *METHOCEL™ – Technical Bulletin* [online]. 2013 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08e5/0901b803808e5f58.pdf
- PADOVNIK, A. – PIQUÉ, F. – JORNET, A. – BOKAN-BOSILJKOV, V. Injection Grouts for the Re-Attachment of Architectural Surfaces with Historic Value – Measures to Improve the Properties of Hydrated Lime Grouts in Slovenia. *International Journal of Architectural Heritage*, 2016, 10(8), s. 993–1007.
- PECHOVÁ, M. *Vliv přísady škrobového mazu na vlastnosti malt ze vzdušného vápna*. Praha, 2018. Diplomová práce. VŠCHT Praha, Fakulta chemické technologie.
- PENELIS, G. G. – PENELIS, G. G. *Structural Restoration of Masonry Monuments: Arches, Domes and Walls*. London: CRC Press, 2020, s. 160. ISBN 9780367109479.
- PERONI, S. Lime-based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes. In: *Mortars, cements and grouts used in conservation for historic buildings: Proceedings of the Symposium*. Rome: ICCROM, 1981, s. 63–99.
- RAJTÁROVÁ, R. *Reštaurovanie malby sv. Vojtecha na severozápadnej fasáde Suchardovho domu v Novej Pake, Injektážne malty modifikované ľahčnými plnivami na vyplnenie dutín vo vápenných omietkach*. Litomyšl, 2018. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování.