Vápenná malta se zvýšenou vnitřní hydrofobicitou

Cristiana Lara Nunes, Zuzana Slížková

Jednou z častých příčin poruch malt a omítek na bázi vzdušného vápna je nadměrný přísun vody do jejich mikrostruktury (například vzlínáním vody z podloží). V souvislosti se zavlhčením podléhají malty v našich klimatických podmínkách nejčastěji dvěma degradačním jevům. První je spojen se změnou fáze vody z kapalné na pevnou při mrznutí. To má za následek nárůst objemu vody a zvýšení pórového tlaku, což může vést ke vzniku trhlin ve vlhké maltě nebo omítce. Druhý degradační proces je spojen s přísunem cizorodých látek (solí) rozpuštěných ve vodě, které mohou krystalizovat a tvořit výkvěty v povrchové vrstvě malty nebo omítky. Kromě negativních dopadů na vzhled omítky má krystalizace a rekrystalizace solí za následek zvýšení vnitřních napětí v maltě či omítce, což podobně jako v případě mrznutí může vést ke vzniku trhlin. Oba zmíněné jevy mají přímý negativní vliv na trvanlivost vápenných omítek a malt.

Pomocí vhodné hydrofobní přísady je možné ovlivnit smáčivost malty, a tak snížit její nasákavost vodou. Snížením nasákavosti lze úspěšně zvýšit jak odolnost malty či omítky proti působení mrazu, tak proti poškození solemi. Je to jedna z cest, jak zlepšit trvanlivost vápenné malty. První zaznamenané použití vápenných malt s přísadou lněného oleje se datuje až do dob Vitruvia (Maciel 1999). Nedávné zahraniční studie vlastností vnitřně hydrofobních vápenných malt se zaměřily na vliv aniontových tenzidů (povrchově aktivních látek) ve funkci hydrofobní přísady, šlo o stearan vápenatý, stearan zinečnatý, oleát sodný (Falchi et al. 2013; Izaguirre et al. 2009; Zhu et al. 2013), a dále na vliv přísady rostlinných olejů (Čechová et al. 2010; Ventolà et al. 2011). Na historickou technologii úpravy vápenné malty olejem a na nedávné publikované výsledky navázal výzkum provedený v ÚTAM v letech 2011–2015. Cílem bylo připravit maltu obsahující křemenný písek, vápenné nebo vápenopucolánové pojivo a přísadu vhodně upravující pórovou strukturu zatvrdlé malty a její smáčivost. Výsledná malta v zatvrdlém stavu měla mít vyšší odolnost vůči cyklům mrznutí a tání, krystalizaci a rozpouštění solí (především zimní posypové soli NaCl) ve srovnání s maltou bez přísady. Řešitelé se zaměřili zejména na zjištění optimálního množství lněného oleje a správnou přípravu čerstvé maltové směsi s olejem, aby byla olejová složka rovnoměrně rozmíchána v maltě. Vedle surového lněného oleje byly sledovány efekty jiných hydrofobních přísad: lněné fermeže (tepelně upraveného oleje) a syntetického hydrofobního prostředku na bázi silanu/siloxanu. V další části výzkumu byl sledován vliv tenzidů na vlastnosti vápenné a vápenopucolánové malty: byly sledovány vlastnosti malt s přísadou laurylsulfátu sodného nebo oleátu sodného. Současně s parametry ovlivňujícími přímo trvanlivost malty nebo omítky byly sledovány vlastnosti důležité pro transport kapalné vlhkosti a vodní páry porézním systémem malty nebo omítky (kapilární nasákavost vodou, rychlost

M. Drdácký et al. (ed.), Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek.
https://doi.org/10.21495/49-9.199-210, © ÚTAM AV ČR, v. v. i., Praha, 2015.

vysychání, propustnost pro vodní páry). Dále bylo zjištěno, jak hydrofobní přísada ovlivnila mechanické vlastnosti malty, zejména její pevnost v tahu za ohybu a v tlaku. Zhodnocení komplexních vlastností navržených malt umožnilo posoudit a navrhnout vhodné aplikace studovaných malt v oblasti oprav historických staveb.

Malty s přísadami lněného oleje nebo fermeže či alkylalkoxysilanu

Zkušební malty byly připraveny z vápenného hydrátu Čerťák třídy CL 90 (vyrobeného ve vápence Čertovy schody, a. s.) a plniva v podobě křemenného písku frakce 0–4 mm se spojitou křivkou zrnitosti, přičemž hmotnostní poměr pojiva a plniva byl 1:3. Kromě čistě vápenných směsí byly také do výzkumu zahrnuty směsi s pucolánovou přísadou, kde byla čtvrtina hmotnosti vápna nahrazena metakaolinem Mefisto L05 (vyrobeného v Českých lupkových závodech, s. r. o.). Přídavek metakaolinu byl zvolen s cílem zvýšit pevnost malty (Grilo et al. 2014), a tak příznivě ovlivnit také odolnost malty proti mrazu (Vejmelková et al. 2012b). Hodnota vodního součinitele při přípravě malt byla navržena tak, aby rozliv čerstvých směsí byl roven 170 ± 5 mm (podle doporučení ČSN EN 1015-3). Byly studovány tři látky ve funkci hydrofobní přísady: lněný olej za studena lisovaný (distribuovaný GRAC, s. r. o), lněná fermež (distribuovaná firmou Cesta Dřeva) a alkylalkoxysilan/siloxan (prostředek Remmers Funcosil WS). Jejich dávkování do směsi odpovídalo 1,5 % hmotnosti pojiva (1,5 % z hmotnosti vápna nebo z hmotnosti směsi vápna a metakaolinu). Složení malt je uvedené v **tabulce 6**.

Tabulka 6: Složení jednotlivých typů malt a obsah vzduchu v čerstvé směsi

Označení	Pojivo	Hydrofobní přísada	Hmotnostní poměr voda / pojivo	Obsah vzduchu v čerstvé směsi [%]
L	vzdušné vápno	-	1,04	2,6 ± 0,1
LO	vzdušné vápno	lněný olej	1,08	5,4 ± 0,2
LBO	vzdušné vápno	lněná fermež	1,10	3,2 ± 0,1
LS	vzdušné vápno	alkylalkoxysilan	1,04	3,5 ± 0,1
LM	vzd. vápno + metakaolin	-	0,96	2,2 ± 0,1
LMO	vzd. vápno + metakaolin	lněný olej	1,02	4,0 ± 0,1
LMBO	vzd. vápno + metakaolin	lněná fermež	1,02	3,5 ± 0,2
LMS	vzd. vápno + metakaolin	alkylalkoxysilan	0,96	3,5 ± 0,3

Příprava směsi probíhala v následujících krocích. Nejprve byly promíchány všechny suché složky plniva a pojiva (kamenivo, vápenný hydrát a v případě vápenopucolánové malty také metakaolin). Poté se odebrala malá část suché směsi (přibližně 5 % objemu) a ta se promíchala v nádobě o vhodné velikosti s hydrofobní přísadou. Do takto připravené směsi bylo v dalších třech krocích přidáno 5 % suché směsi, aby došlo k rovnoměrnému rozmísení hydrofobní přísady. Poté se tato směs přidala zpět do suché směsi a obě složky (suchá směs a směs s rozmíchaným olejem) byly důkladně promíseny. Poté byla přidána voda v uvedeném množství. Připravené čerstvé maltové směsi obsahovaly různé množství vzduchu, které

je zaznamenané v **tabulce 6 (**vyhodnoceno dle ČSN EN 1015-7). Z takto připravených směsí byly vyrobeny zkušební trámce s rozměry 40 × 40 × 160 mm, které byly uloženy na 90 dnů v prostředí s řízenou teplotou (20 ± 5 °C) a relativní vlhkostí (60 ± 10 %).

Experimentální výzkum byl zaměřen na vyhodnocení fyzikálních vlastností včetně mechanických vlastností. Otevřená pórovitost zatvrdlých malt byla určena pomocí ČSN EN 1936, nasákavost ponořením do vodní lázně po dobu 48 hodin (Teutonico 1988) a mechanické charakteristiky (tahová pevnost za ohybu, tlaková pevnost) podle ČSN EN 1015-11. Distribuce velikosti pórů byla změřena pomocí rtuťové porozimetrie podle doporučení RILEM I.5 a koeficient kapilární absorpce vodou byl na zatvrdlých maltách zjištěn podle metodiky uvedené v ČSN EN 1015-18. Mikrostruktura byla zjišťována pod optickým mikroskopem na tzv. nábrusech připravených ze vzorků malt.

Odolnost proti mrazu byla vyhodnocena podle ČSN 72 2452. Vzorky byly nejprve ponořeny do vody o teplotě 20 ± 5 °C až do dosažení jejich konstantní hmotnosti. Každý zmrazovací cyklus se skládal ze zmrazení po dobu 4 hodin při teplotě –20 ± 5 °C a minimálně 2 hodin volného tání ve vodě při teplotě 20 ± 5 °C. Po každých 5 zmrazovacích cyklech byl určen hmotnostní úbytek malt. Po ukončení posledního cyklu byly trámce malt vysušeny do konstantní hmotnosti a podrobeny mechanickým zkouškám. Z každé testované sady byly zmrazovány 3 vzorky (označeny Fa).

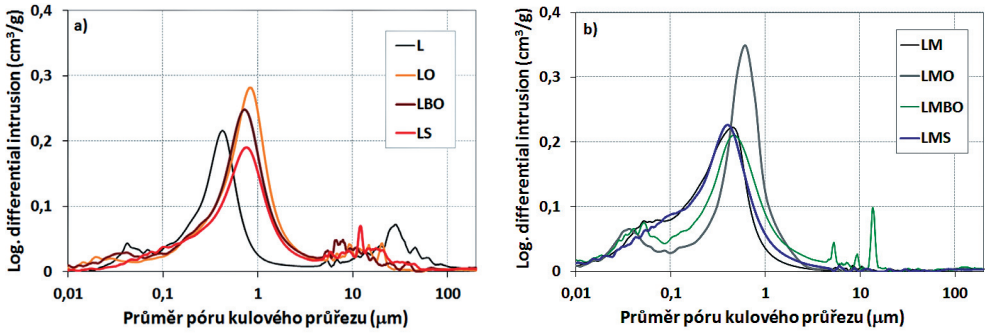
Odolnost proti solím byla vyhodnocena podle ČSN 73 1326. Tři zkušební tělesa (označena Sa) byla cyklicky máčena 8 hodin v 3% roztoku NaCl a následně byla 16 hodin vysoušena při teplotě 60 °C. Po každých 5 cyklech byla tělesa zvážena, změřena a byla pořízena fotodokumentace vzhledu a příp. defektů maltových trámců.

Kromě vlivu mrazení a tání a vlivu krystalizace NaCl byl sledován také vliv dlouhodobého namočení malt do vody při laboratorní teplotě. Tyto malty byly označeny Wa, nebyly zmrazované a byly ponořené v destilované vodě po dobu trvání zmrazovacích nebo krystalizačních cyklů na maltách Fa nebo Sa.

Tabulka 7: Fyzikální a mechanické parametry jednotlivých typů malt v zatvrdlém stavu ve stáří 3 měsíce

Složení	Pórovitost [%]	Nasákavost 48 h [%]	Tahová pevnost za ohybu [MPa]	Tlaková pevnost [MPa]
vzdušné vápno	32,0 ± 0,2	17,1 ± 0,2	0,54 ± 0,06	1,01 ± 0,03
vzdušné vápno + olej	34,4 ± 0,6	2,3 ± 0,6	1,34 ± 0,07	2,29 ± 0,20
vzdušné vápno + fermež	34,7 ± 0,5	4,1 ± 0,5	0,53 ± 0,04	1,79 ± 0,16
vzdušné vápno + silan	29,4 ± 0,5	15,4 ± 0,1	0,82 ± 0,09	1,41 ± 0,11
vzdušné vápno + metak.	34,4 ± 0,1	21,6 ± 0,9	1,65 ± 0,20	6,71 ± 0,65
vzdušné vápno + metak. + olej	32,4 ± 0,5	6,0 ± 2,6	1,26 ± 0,26	4,02 ± 0,23
vzdušné vápno + metak. + fermež	34,4 ± 0,3	16,1 ± 0,4	0,75 ± 0,14	6,29 ± 0,31
vzdušné vápno + metak. + silan	32,8 ± 0,2	16,6 ± 0,4	0,85 ± 0,17	4,46 ± 0,69

Fyzikální a mechanické vlastnosti malt ve stáří 3 měsíců, které nebyly vystaveny mrazu ani solím, jsou uvedeny v **tabulce 7**. Z výsledků prezentovaných v **tabulkách 6** a **7** je patrné, že všechny tři přísady zvýšily obsah vzduchu v čerstvé maltě a nejvíce z nich surový lněný



Obrázek 161: *Distribuce velikosti pórů: vápenné malty L (vlevo), vápenopucolánové malty LM (vpravo). Značení: malty bez přísady – L nebo LM, s přísadou oleje – LO nebo LMO, fermeže – LBO nebo LMBO, silanu – LS nebo LMS). Pro každou maltu je uvedena reprezentativní křivka z měřených tří vzorků*

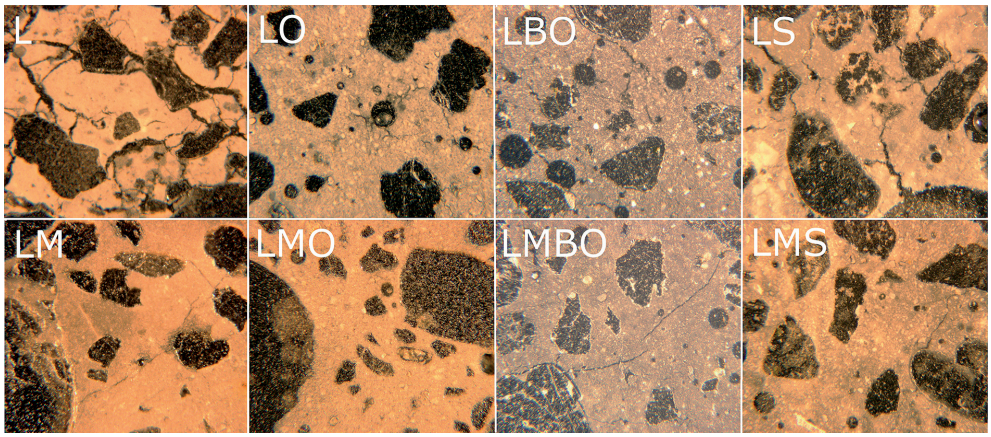
olej. Objem pórů v zatvrdlých maltách se však změnil díky přísadám jen málo (mírné zvýšení pórovitosti bylo zaznamenáno pouze u čistě vápenné malty upravené surovým lněným olejem nebo fermeží. V těchto maltách byl ale také mírně vyšší vodní součinitel při přípravě čerstvých malt, což může být příčinou mírně vyšší pórovitosti). Pórovitost zatvrdlé vápenopucolánové malty se nezvýšila ani vlivem oleje, ani vlivem fermeže, ani vlivem alkylalkoxysilanu, při dávkování příměsi v množství 1,5 % z hmotnosti pojiva malty.

Z výsledků rtuťové porozimetrie (viz **obrázek 161)** je patrný malý vliv přísad na změnu velikosti pórů v rozsahu 10 nm až 200 μm v zatvrdlé maltě. Použitá metoda neumožňuje hodnotit větší póry. Vápenná malta bez přísady měla ve sledovaném rozsahu nejvíce pórů s průměrem přibližně 0,4 μm. Vlivem přísad se tato velikost pórů mírně zvýšila; průměr se přiblížil 1 μm. Ani u vápenopucolánové malty nejsou změny ve velikosti pórů v měřené oblasti výrazné. Došlo k mírnému zvětšení průměru pórů v oblasti 0,1 až 1 μm. Pouze surový lněný olej vyvolal kromě mírného zvětšení velikosti pórů také nárůst množství pórů v této velikostní oblasti. Nejmenší změny ve struktuře pórů byly zaznamenány v případě silanu, kde naměřená křivka rozložení velikosti pórů byla velmi podobná maltě bez přísady.

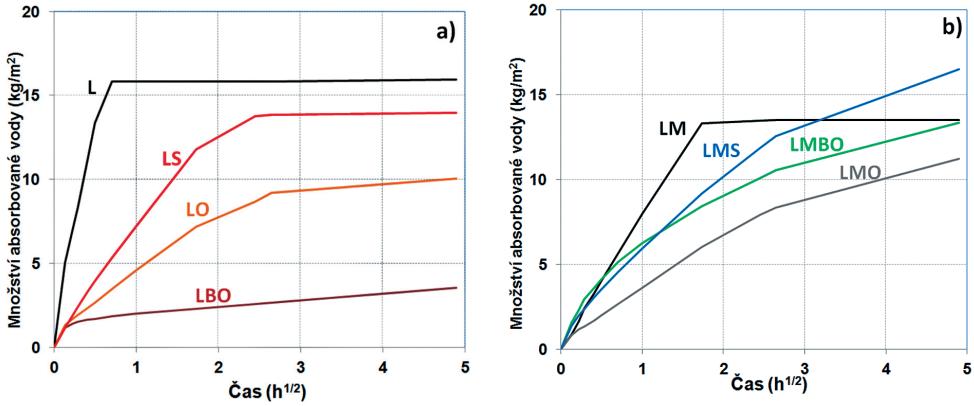
Pod optickým mikroskopem byly vyšetřeny větší póry a trhliny v zatvrdlých maltách (**obr. 162**). Vápenné malty s hydrofobními přísadami měly méně smršťovacích trhlin, a tím pádem lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s vápennou maltou bez přísady. Pod mikroskopem byly zaznamenány póry s kulovitým tvarem s průměrem přes 200 μm. Nejlepší strukturu a nejvyšší pevnosti měla vápenná malta s příměsí surového oleje (**tabulka 7**).

Vápenopucolánová malta měla bez přísad ve srovnání s čistě vápennou maltou jen mírně vyšší pórovitost, ale výrazně vyšší pevnosti (1,6 MPa v ohybu a 6,7 MPa v tlaku). S přísadami se ovšem mechanické charakteristiky vápenopucolánové malty pohoršily. Nižší pevnosti vápenopucolánových malt s hydrofobní přísadou nelze přičítat smršťovacím trhlinám. Je zřejmé, že přísady nepříznivě ovlivnily proces tuhnutí a tvrdnutí vápenopucolánové malty v neprospěch vzniku fází přispívajících k vyšší pevnosti zatvrdlé malty.

Všechny přísady byly funkční ve smyslu omezení nasákavosti vápenopucolánové malty, přičemž nejefektivnější byla přísada surového oleje. Silan snížil nasákavost obou typů malt nejméně. Fermež měla lepší efekt u vápenné malty, malý u vápenopucolánové malty. Surový olej snížil nejvíce nasákavost obou typů malt a navíc měl pozitivní vliv i na pevnosti vápenné malty.



Obrázek 162: *Mikrostruktura vápenných malt (nahoře) a vápenopucolánových malt (dole). Výbrus malty pod optickým mikroskopem. Zleva: malta bez přísady, s přísadou oleje (O), fermeže (BO), silanu (S).*

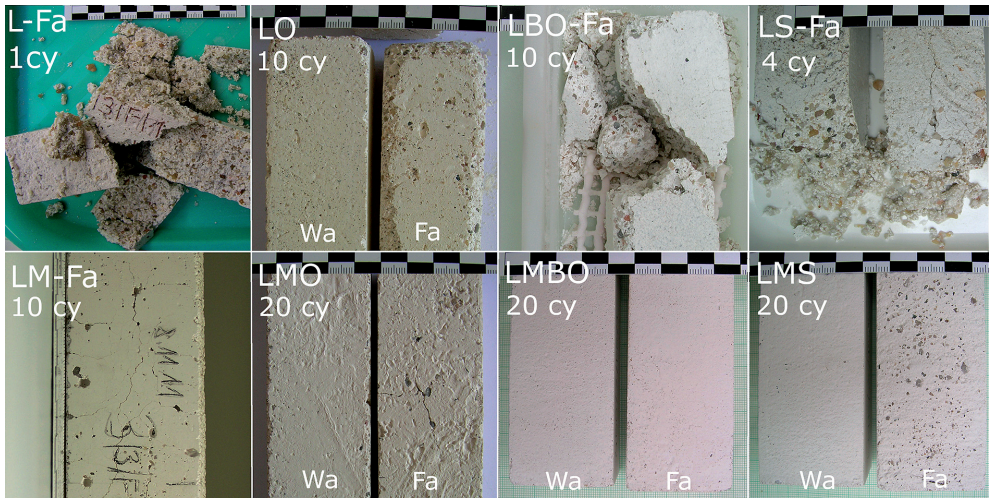


Obrázek 163: *Křivky kapilární absorpce: vápenné malty L (vlevo), vápenopucolánové malty LM (vpravo). Malta bez přísady (L / LM), s přísadou oleje (LO / LMO), fermeže (LBO / LMBO), silanu (LS / LMS)*

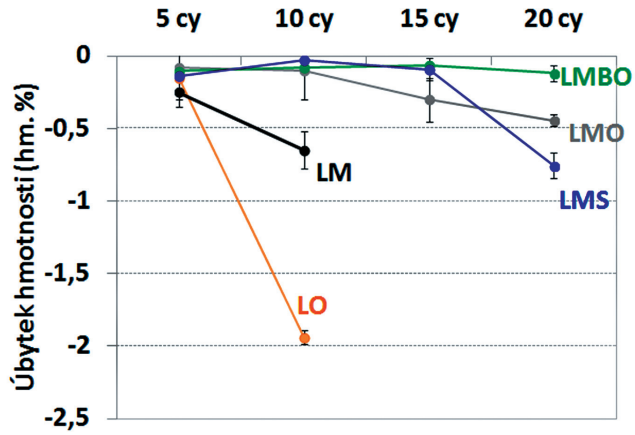
Obrázek 163 zobrazuje průběh kapilární nasákavosti malt vodou během prvních 24 hodin. V případě vápenné malty byla kapilární nasákavost nejefektivněji snížena pomocí lněné fermeže, zatímco v případě vápenopucolánové malty tomu tak bylo pro lněný olej. Silan měl nejmenší vliv na kapilární nasákavost pro oba typy malt.

Odolnost proti mrazu byla vyhodnocena na základě monitorování vzhledu jednotlivých maltových trámců, dále na základě úbytku hmotnosti zmrazovaných malt a také vyhodnocením mechanických parametrů po určitém počtu cyklů zmrazení a tání. Na základě publikovaných poznatků (Drdácký 2011) byla měřena ohybová pevnost, která je více citlivá na změny mikrostruktury materiálu.

Obrázek 164 zobrazuje fotografie vizuálního monitoringu reprezentativních vzorků pro jednotlivé typy malt na konci testování. Vápenná malta bez hydrofobní přísady se rozpadla již během prvního cyklu zmrazování. Vápenná malta se silanem se rozpadla po čtvrtém



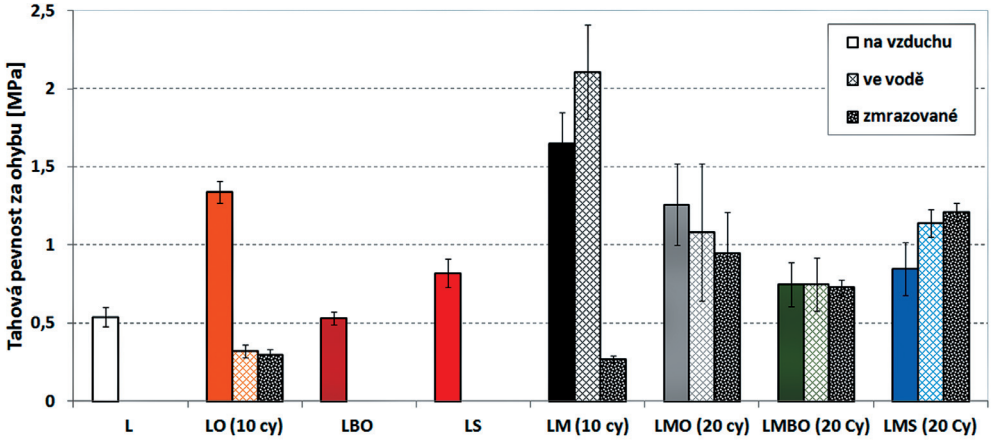
Obrázek 164: *Vizuální monitoring malt během testování odolnosti proti mrazu*



Obrázek 165: *Hmotnostní úbytky během testování odolnosti proti mrazu*

zmrazovacím cyklu, zatímco malta se lněnou fermeží se rozpadla po desátém zmrazovacím cyklu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s přísadou lněného oleje, kde vzorky po deseti cyklech vykazovaly mírné poškození. V případě vápenopucolánových malt bylo obecně dosaženo lepších výsledků. Zatímco referenční malta bez hydrofobní přísady byla po deseti zmrazovacích cyklech poškozená sítí jemných trhlin, malty se lněným olejem či silanem obsahovaly pouze několik drobných trhlinek a rozpad matrice okolo větších zrn písku po deseti či dvaceti cyklech. V tomto případě bylo nejlepších výsledků dosaženo pro lněnou fermež, kde malta nevykázala po 20 cyklech téměř žádné poruchy.

Obrázek 165 zobrazuje hmotnostní úbytky, které byly měřeny po každých pěti cyklech zmrazení a rozmrazení. Výsledky mechanických zkoušek jsou zobrazeny v **obrázku 166**. Vápenná malta se lněným olejem vykázala po deseti zmrazovacích cyklech pokles tahové pevnosti

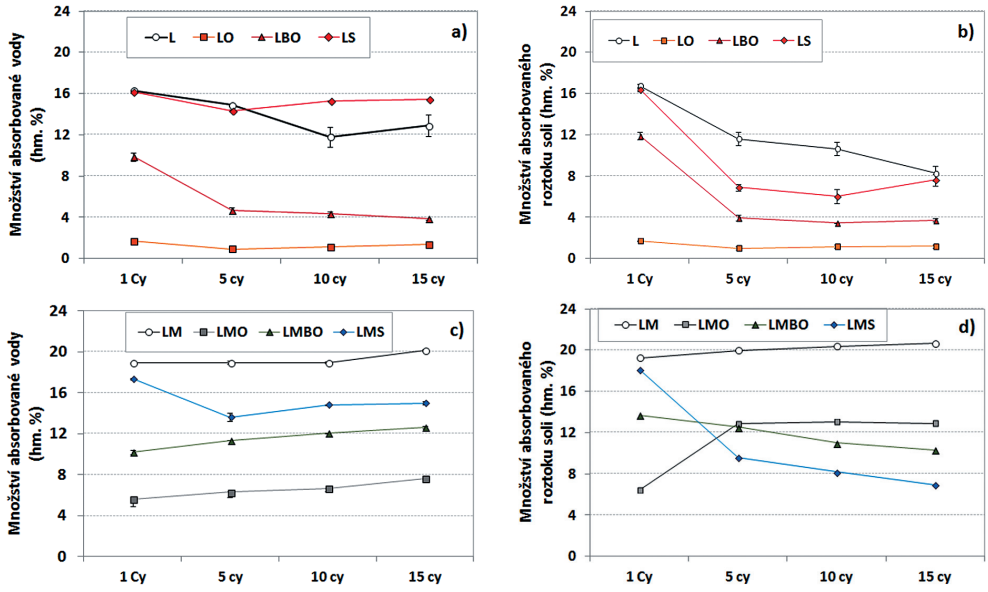


Obrázek 166: *Tahová pevnost za ohybu pro jednotlivé typy malt a jednotlivé hydrofobní přísady ve stejném stáří, ve vysušeném stavu, po různém zatěžování zatvrdlých malt: 1) referenční – uložené v lab. podmínkách (na vzduchu), 2) namočené ve vodě o teplotě 20 ˚C a 3) zmrazované*

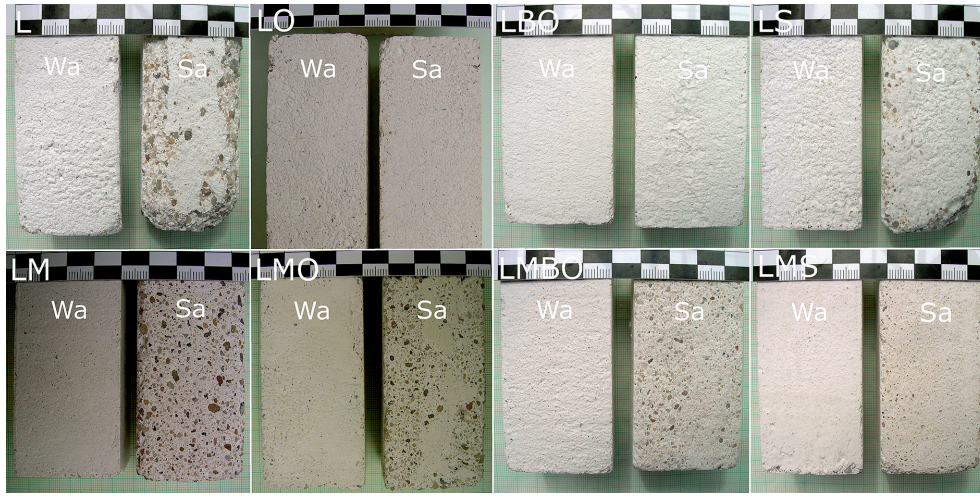
za ohybu o 78 % jak pro vzorky zmrazované, tak pro vzorky udržované pouze ve vodě. Tento výsledek indikuje, že v případě vápenné malty již samotné ponoření do vodní lázně výrazně snižuje pevnost, což lze přisoudit rozpouštění uhličitanu vápenatého a případných zbytků hydroxidu vápenatého v pojivu malty. Vápenné malty bez hydrofobní přísady jsou citlivé na působení mrazu, který způsobuje pokles pevnosti a porušení trhlinami. U čistě vápenné malty pouze přísada surového lněného oleje zlepšila mrazuvzdornost malty natolik, že malta byla soudržná i po 10 cyklech zmrazení a tání, nicméně pevnost zmrazované malty byla výrazně nižší než před mrazením.

Vápenopucolánová malta bez hydrofobní přísady vystavená působení mrazu vykázala výrazný pokles pevnosti po 10 cyklech (o 84 %), zatímco vzorky ponořené pouze do vodní lázně vykázaly nárůst pevnosti. Tento nárůst byl pravděpodobně způsobený podporou pucolánové reakce díky přítomnosti vody. Vápenopucolánová malta bez hydrofobní přísady má vyšší pevnost ve srovnání s čistě vápennou maltou, z čehož vyplývá i lepší odolnost vůči mrazovým cyklům. Z hlediska mrazuvzdornosti má však vápenopucolánová malta také nevýhodnou strukturní vlastnost, a to je vyšší zastoupení menších pórů, ve kterých při zmrazovacích cyklech vzniká vyšší tlak. Ačkoli vápenopucolánová malta s přídavkem hydrofobních přísad má tendenci mít nižší tahovou pevnost za ohybu než malta bez přísad (**tabulka 7**), její odolnost proti mrazu je po úpravě hydrofobními přísadami vyšší.

Odolnost proti solím byla vyhodnocena na základě monitorování vzhledu vizuálně a na základě průběžného měření hmotnosti jednotlivých vzorků (hmotnosti nasáklé vody a hmotnosti nasáklého 3% vodného roztoku NaCl) při prvním, pátém, desátém a patnáctém cyklu (**obrázek 167**). Na základě výsledků těchto měření lze konstatovat, že malty se lněným olejem a se lněnou fermeží absorbovaly výrazně nižší objem vody, což je v souladu s výsledky nasákavosti malt při ponoření do vody na 48 hodin. Konfigurace malt L, LBO, LS a LMS absorbovala při pátém cyklu méně solného roztoku než při prvním cyklu. Tento pokles je způsobený snížením schopnosti absorbovat roztok soli z důvodu změny difuzního procesu vlivem již vytvořených krystalů solí. Naopak vápenopucolánová malta s olejem LMO vykázala nárůst absorbovaného množství solného roztoku mezi prvním a pátým cyklem. Tento jev lze vysvětlit tím, že krystaly



Obrázek 167: *Hmotnost nasáklé vody (vlevo) a solného roztoku (vpravo): vápenné malty (nahoře), vápenopucolánové malty (dole) při opakovaných zkouškách kapilární nasákavosti malt*



Obrázek 168: *Vizuální hodnocení vzhledu malt během zkoušky odolnosti malty proti krystalizaci NaCl*

soli usazené na povrchu pórů redukují efekt hydrofobní přísady, mění smáčivost stěn pórů malty a usnadňují pronikání solného roztoku v průběhu dalších cyklů. Projevil se také rozdíl v chování čistě vápenné a vápenopucolánové malty. Vápenná malta bez přísad ve vysušeném stavu absorbovala cca 16 % hm. vody při prvním nasáknutí a o něco menší množství při 15. nasáknutí vodou (13 % hm). Absorpční kapacita pro vodu se tak příliš nezměnila ani po opakovaném nasáknutí a vysušení vody. Absorpční kapacita pro solný roztok ale u vápenné malty postupně

výrazně klesá – zatímco při prvním nasáknutí absorbovala malta 16 % hm. solného roztoku, při 15. nasáknutí již jen poloviční množství – 8 % hm. Vlivem hydrofobních přísad se v různé míře snížila absorpční kapacita vápenné malty pro vodu, nejvíce a podstatně vlivem surového oleje, minimálně vlivem silanu. U olejové přísady je hydrofobní efekt trvanlivý, tzn., že kapacita olejem upravené vápenné malty absorbovat vodu je stejná i při 15. opakovaném nasáknutí vodou (cca 2 % hm.). U přísady fermeže se časem hydrofobní efekt zlepšuje (schopnost fermeží upravené malty absorbovat vodu je při 5. nasáknutí menší a hydrofobní efekt se dále mírně zlepšuje až na nasákavost cca 4 % hm. při 15. cyklu). Pokud jde o schopnost absorbovat opakovaně solný roztok NaCl, jak bylo zmíněno výše, přísady snížily absorbované množství roztoku soli maltou a při 5. cyklu bylo toto množství ještě nižší. Nejvyššího efektu bylo dosaženo přísadou surového oleje, kdy byla naměřena absorpční kapacita upravené vápenné malty pro roztok soli kolem 2 % hm. a tato hodnota byla trvanlivá v rozsahu sledovaných 15 cyklů nasáknutí roztoku do malty. Vápenná malta upravená fermeží měla absorpční schopnost pro roztok soli v prvním cyklu cca 12 % hm., zatímco v 15. cyklu už pouze 4 % hm.

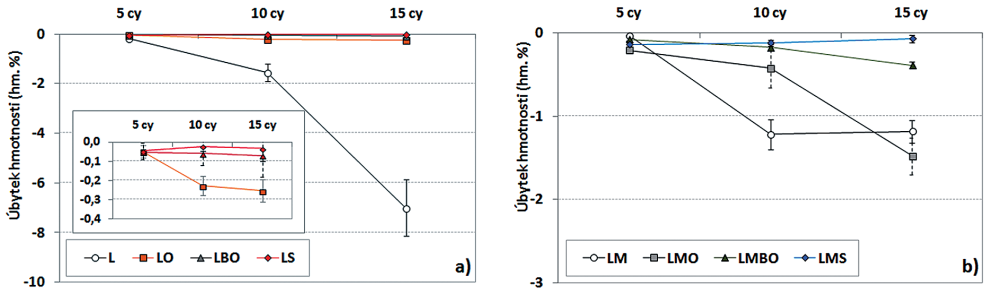
Vápenopucolánová malta bez přísad ve vysušeném stavu absorbovala cca 19 % hm. vody při prvním nasáknutí a absorpční kapacita v dalších cyklech nepatrně vzrostla (na 20 % hm.). Podobné hodnoty byly zjištěny i pro absorpci solného roztoku. Hydrofobní přísady snížily schopnost malty absorbovat solný roztok a při opakovaném nasáknutí došlo k dalšímu snížení s výjimkou malty s olejem. Hodnoty absorpce solného roztoku hydrofobizovanými maltami se pohybují v 15. cyklu mezi 8 a 13 % hm. Je tedy zřejmé, že vápenopucolánová malta i po úpravě hydrofobními přísadami absorbuje do svého porézního systému více solného roztoku.

Obrázek 168 zobrazuje fotografie vizuálního monitoringu reprezentativních vzorků pro jednotlivé typy malt. Vzorky vystavené 3% roztoku NaCl obecně vykazovaly poškození zrnitým rozpadem malty na povrchu trámců. Malty LO, LBO a LMS vykazují malé rozdíly mezi vzorky vystavené krystalizačním cyklům soli a vzorky uloženými pouze ve vodní lázni. Vzorky neupravené vápenné malty vykázaly silný zrnitý rozpad, zatímco vzorky vápenné malty se silanem střední (zrnitý) rozpad. Neupravená vápenopucolánová malta byla silně poškozená rozpadem, zatímco vápenopucolánová malta s olejem středně poškozená rozpadem.

Obrázek 169 zobrazuje vývoj úbytku hmotnosti pro jednotlivé typy malt. Tyto výsledky jsou ve velmi dobré shodě s vizuálním monitoringem. Vápenné malty se lněným olejem a se lněnou fermeží měly nejnižší hmotnostní úbytky, zatímco v případě vápenopucolánové malty tomu tak bylo pro lněnou fermež a silan. Díky nižší absorpční kapacitě a nižší kapilární nasákavosti mají vápenné malty s olejem vyšší odolnost proti solím. V případě vápenopucolánových malt byly nejnižší hmotností úbytky pozorovány u malty upravené silanem, což však nelze přisoudit hydrofobicitě, protože tato malta měla vyšší nasákavost.

Na základě výše popsaných výsledků lze konstatovat, že lněný olej a fermež zvyšují hydrofobicitu (snižují smáčivost malt vodou) více než silan. V případě vápenopucolánové malty byla nejvyšší odolnost vůči účinkům krystalizace NaCl z nasáklého roztoku při vysušování malty pozorována u malty upravené lněnou fermeží.

V průběhu experimentu nebyly zkoušeny synergické účinky mrazových cyklů a krystalizačních cyklů solí. U čistě vápenné malty pouze přísada surového lněného oleje zlepšila mrazuvzdornost malty natolik, že malta byla soudržná i po 10 cyklech zmrazení a tání. Všechny přísady ale byly efektivní ve zkoušce odolnosti vůči krystalizaci NaCl. Úprava vápenné malty přísadou lněného oleje zvyšuje trvanlivost malty v případě její expozice opakovanému mrznutí i působení roztoku NaCl.



Obrázek 169: *Hmotnostní úbytky během zkoušky odolnosti malty proti krystalizaci NaCl: vápenné malty (vlevo), vápenopucolánové malty (vpravo)*

V případě vápenopucolánové malty bylo nejlepších výsledků z hlediska mrazuvzdornosti dosaženo po úpravě malty lněnou fermeží, kdy malta nevykázala po 20 cyklech zmrazení téměř žádné poruchy. Tato úprava se ukázala velmi výhodná i z hlediska odolnosti vápenopucolánové malty vůči krystalizačním cyklům NaCl. Rozdíly v efektu hydrofobních přísad nejsou u vápenopucolánové malty velké a lze konstatovat, že všechny studované látky – lněný olej, fermež i alkylalkoxysilan významně pozitivně ovlivnily mrazuvzdornost vápenopucolánové malty. V případě expozice malty opakovanému mrznutí i působení roztoku NaCl se zdá jako nejvýhodnější úprava vápenopucolánové malty lněnou fermeží.

Parametry modifikovaných malt byly ověřeny laboratorními zkouškami a odolnost malt vůči mrznutí a krystalizaci solí vybraných malt byla hodnocena při jejich expozici reálným klimatickým faktorům na zkušebních plochách vymezených na reálných historických konstrukcích (hřbitovní zdi v Krchlebech a obvodové zdi márnice hřbitova v Ostrovci). Výsledky provedených experimentů vedly k formulaci dvou užitných vzorů a jedné certifikované metodiky. Vědecké poznatky byly prezentovány ve dvou disertačních pracích. Malta podle užitného vzoru CZ 28676 U1 „Suchá maltová směs pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností“ byla použita pro opravu ohradní zdi kolem kostela Sv. Václava a hřbitova v Krchlebech u Čáslavi v roce 2015. Všechny tři výsledky aplikovaného výzkumu dosažené v rámci řešení projektu byly využity při opravě vnější omítky hřbitovní márnice v Ostrovci v západních Čechách.

Hlavním cílem projektu byl vývoj nových vysokohodnotných a kompatibilních vápenných malt pro extrémní použití při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví, vytvoření nástrojů pro jejich optimalizaci a numerickou simulaci a ověření jejich aplikace na vybraných modelových historických objektech. Nově vyvinuté materiály – malty – mají prodlouženou životnost ve srovnání s klasickými vápennými maltami a jsou vhodné pro opravu historických památkově chráněných staveb zatížených průnikem dešťové, zatékající a odstřikující vody. Jedná se především o horizontální povrchy architektonických prvků, místa kontaktu fasády se střechou objektu, okolí vyústění svislých dešťových svodů apod. Použití vnitřně hydrofobní vápenometakaolinové malty není vhodné v místech, kde je podklad (zdivo) trvale zavlhčován vzlínáním zemní vlhkosti nebo prosakováním vody z přilehlého vlhkého terénu. V takových případech je nutno počítat s tím, že vysychání vody ze zavlhčeného zdiva přes vnitřně hydrofobní omítku do ovzduší je ve srovnání s hydrofilní, kapilárně aktivní omítkou pomalejší.

Voda pronikající z vnějšího prostředí do stavební konstrukce je nežádoucí z hlediska potenciálního mrazového poškození omítky a případně i zdiva pod omítkou. Pronikající voda je často kontaminovaná vodorozpustnými solemi, které přispívají k degradaci porézní malty a případně i zdiva krystalizačními a hydratačními tlaky při teplotních a vlhkostních změnách. Snížením nasákavosti omítky a úpravou její porézní struktury díky přísadě oleje nebo tenzidů do čerstvé malty je rychlost průniku vody do omítky i celkové množství nasáknuté vody a roztoků soli do omítky nízké. Omítka upravená přísadami má tak delší životnost a zároveň je funkční ochranou zdiva před degradačními účinky z vnějšího prostředí pronikající vody.

Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI DF11P01OVV008 „Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví“.

Použitá literatura

Čechová, E., I. Papayianni a M. Stefanidou. Properties of lime-based restoration mortars modified by the addition of linseed oil. In: Válek, J., C. Groot a J. J. Hughes. *2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Final workshop: HMC2010.* Bagneux: RILEM Publications, 2010. ISBN 978-2-35158-112-4.

Drdácký, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage.* 2011, 5(4-5), 383-394. http://dx.doi.org/10.1080/15583051003717788

Falchi, L., U. Müller, P. Fontana, F. C. Izzo a E. Zendri. Influence and effectiveness of water-repellent admixtures on pozzolana-lime mortars for restoration application. *Construction and Building Materials.* 2013, 49, 272-280. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.030

Grilo, J., A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro, R. Veiga a A. Velosa. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials.* 2014, 51, 287-94. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045

Chandra, S. a J. Aavik. Influence of black gram (natural organic material) addition as admixture in cement mortar and concrete. *Cement and Concrete Research.* 1983, 13(3), 423-430. http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(83)90043-1

Izaguirre, A., J. Lanas a J. I. Álvarez. Effect of water-repellent admixtures on the behavior of aerial lime-based mortars. *Cement and Concrete Research.* 2009, 39(11), 1095-1104. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.026

Janotová, D. *Vliv provzdušňovacích přísad na mrazuvzdornost metakaolinových malt.* Dizertační práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.

Janotová, D. a Z. Slížková. *Suchá maltová směs pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností.* Užitný vzor. Číslo vzoru: CZ 28676 U1, Úřad průmyslového vlastnictví, 2015. http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028676.pdf

Justnes, H., T. A. Ostnor a N. B. Vila. Vegetable oils as water repellents for mortars. In: Proceedings *1st International Conference Asian Concrete Federation.* Chiang Mai: TCA, 2004.

Liles, D. T. The fascinating world of silicones and their impact on coatings. In: Rawlins, J. a R. Storey (eds.). *The waterborne symposium: proceedings of the 39th annual international waterborne, high-solids and powder coatings symposium.* Lancaster (PA): DES-tech Publications, 2012. ISBN 978-1-60595-074-7.

Lu, Z., X. Zhou a J. Zhang. Study on the performance of a new type of water-repellent admixture for cement mortar. *Cement and Concrete Research.* 2004, 34(11), 2015-2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.019

Maciel, M. J. *Vitrúvio, Tratado de Arquitectura* (Translated from Latin). Lisabon: Instituto Superior Técnico, 1999.

Nunes, C. *Lime based mortars with a traditional water repellent admixture: a study on transport phenomena during ageing.* Disertační práce, FSV ČVUT v Praze, 2015.

Nunes, C., Z. Slížková, D. Frankeová a P. Hauková. Vápenná vnitřně hydrofobní malta. Užitný vzor. Číslo vzoru: CZ 28822 U1, Úřad průmyslového vlastnictví, 2015. http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028822.pdf

Nunes, C., Z. Slížková a D. Křivánková. Lime-based mortars with linseed oil: sodium chloride resistance assessment and characterization of the degraded material. *Periodico di Mineralogia.* 2013, 82(3), 411-427. http://dx.doi.org/10.2451/2013PM0024

Perkins, P. H. *Repair, protection and waterproofing of concrete structures.* New York: Elsevier, 1986.

RILEM Commission 25-PEM, Tentative Recommendations. *Materials and Structures.* 1980, 13(3), 192-193.

Slížková, Z., D. Frankeová, C. L. Nunes a D. Janotová. *Příprava omítky se zvýšenou mrazuvzdorností pro opravy historických staveb.* Certifikovaná metodika, Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 101, 2015.

Teutonico, J. M. *Laboratory Manual for Architectural Conservators.* Rome: ICCROM, 1988.

Vejmelková, E., M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner a R. Černý. Mechanical, fracture mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials.* 2012, 31, 22-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084

Vejmelková, E., M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner a R. Černý. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites Part B: Engineering.* 2012, 43(8), 3534-3340. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.053

Ventolà, L., M. Vendrell, P. Giraldez a L. Merino. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials.* 2011, 25(8), 3313-3318. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020

Vikan, H. a H. Justnes. Influence of vegetable oils on durability and pore structure of mortars. In: V. M. Malhotra (ed.). *Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete.* Montreal: ACI, 2006, SP-234-25.

de Vries, J. a R. B. Polder. Hydrophobic treatment of concrete. *Construction and Building Materials.* 1997, 11(4), 259-265. http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00046-9

Wendler, E., a A. E. Charola. Water and its interaction with porous inorganic building materials. In: Clercq, H. (ed.). *Hydrophobe V, 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials.* Brussels: Aedificatio Publishers, 2008, 57-74.

Zhu, Y-G., S-C. Kou, C-S. Poon., J-G. Dai a Q-Y. Li. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites.* 2013, 35(1), 32-38. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008