



Obr. 1 Vápencový architráv s vertikální prasklinou – *reis* Ahmad při vyrovnávání obou dílů architrávu do původní polohy (foto H. Vymazalová)

Nové materiály pro restaurátorské práce v Abúsíru

Martin Dvořák

V rámci archeologické sezóny na lokalitě jižní Abúsír v letech 2012–2013 pokračovala i další etapa restaurátorských prací. Mezi nejzajímavější a zároveň nejkomplikovanější projekty patřilo v této sezóně restaurování jednotlivých stavebních a výzdobných součástí dvora hrobového komplexu princezny Šeretnebtaj. Během restaurátorského zásahu, který se týkal restaurování čtyř dochovaných vápencových pilířů a poškozeného architrávu, byly vedle klasických postupů použity i dva nové špičkové materiály. Prvním byly karbonové kompozity, donedávna používané především pro aplikace ve zbrojním průmyslu a při konstrukci raket a letadel, a druhým nanomateriály, struktury, které se staly v posledních letech vědeckým hitem – před třemi lety byla za výzkum nanostruktur uhlíku udělena Nobelova cena za fyziku.

Vstupní průzkum stavu

Na počátku archeologického průzkumu této lokality byl celý komplex překryt mohutnou vrstvou písku a suti s mocností více než 3 m nad korunou zdiva. Během jejího odstraňování se postupně začaly objevovat různě velké fragmenty vápencových bloků a posléze i čtyři – pouze hrubě opracované – ploché vápencové bloky (obr. 2). Všechny čtyři vápencové desky byly uloženy horizontálně

v severojižním směru a měly podobnou délku a šířku cca 170×90 cm a tloušťku cca 25 cm. Na jižní straně se pod těmito bloky objevil vodorovně položený opracovaný blok s východozápadní orientací, o čtvercovém průřezu cca 48 cm (š) \times 50 cm (v) a délce cca 240 cm, rozlomený na dva kusy (vertikální prasklina vedla cca 100 cm od západního konce bloku). Po odstranění další části zásypu vyšlo najevo, že jde o poškozený, ale *in situ* v navátém písku uložený architráv podírající čtyři zbylé stropní desky

(obr. 1). Jeho východní strana ležela na vrcholu jednoho z pilířů, západní pak na obvodové stěně pilířového dvora. Během dalších prací se postupně objevily další tři pilíře. Ty byly rozmístěny půdorysně do tvaru téměř pravidelného čtverce. Jednotlivé pilíře byly dvojí velikosti – dva jižněji orientované měly pravidelný čtvercový průřez o straně jednoho staroegyptského lokte (52,5 cm). Dva severnější měly celkově o něco menší obdélníkový průřez, s východozápadními stranami o délce 50 cm a severojižními o délce cca 48 cm. Výška všech čtyř pilířů dosahovala cca 320 cm. Na jižní straně všech čtyř pilířů byly i pod silnými nánosy nečistot dobře patrné hieroglyfické texty (Vymazalová – Dulíková 2012).

V této fázi jsme další práce přesunuli do jiné části dvora, aby bylo možné ve spolupráci s egyptskými kolegy z památkového inspektorátu a restaurátorského oddělení zvolit optimální postup a navrhnout konkrétní kroky restaurátorského zákroku. Proto byl proveden podrobný průzkum stavu jednotlivých vápencových bloků. Ten zahrnoval v první řadě jejich podrobnou vizuální inspekci, která měla za cíl nalézt a pojmenovat nejdůležitější působící vlivy s negativním dopadem a popsat působící degradační procesy. Teprve na základě vyhodnocení výsledků průzkumu bylo možné posoudit celkový stav jednotlivých bloků a navrhnout nejvhodnější způsob jejich restaurování.

Obecně lze nejdůležitější degradační vlivy působící v oblasti abúsírské nekropole shrnout do následujících skupin (Dvořák 2002 a 2005):

- dlouhodobě silně kolísající relativní vlhkost, velké a prudké výkyvy v teplotě
- větrná eroze
- silné zatížení materiálů vodorozpustnými solemi – především chloridy
- biodegradace – aktivity plísní, kvasinek, vyšších organismů

- intenzivní sluneční záření – zejména jeho UV složka
- přímé negativní působení člověka (vykrádání hrobek, zloději kamene, vandalové...)
- nepřímé negativní působení člověka (kontaminace spodních vod, znečištění ovzduší...)

Průzkum a charakteristika použitého kamene

Nalezené bloky byly vytesány z vápence, který byl v oblasti abúsírské nekropole v době Staré říše jedním z materiálů nejčastěji používaných ke stavebním, uměleckým i dekorativním účelům. Většinou se jedná o vápence patřící k tzv. Mokattamské formaci. Geologicky je lze charakterizovat jako organodetrinitické vápence, které jsou tvořeny převážně jemnozrnnými agregáty chemicky vysráženého kalcitu s příměsí jílových minerálů. V menším množství jsou ve struktuře přítomny i detritické složky (úlomky a zbytky schránek různých prvoků čeledi Foraminifera, rodu Nummulitus) a epigenetické minerály (kalcitové vyrostlice a kalcitové žilky). Charakteristickou vlastností této horniny je vysoká porozita. Z hlediska mineralogie jsou schránky numulitů tvořeny vysoce čistým kalcitem s pouze nepatrnou příměsí jílových minerálů a limonitu. Strukturně se jedná o homogenní jemnozrnný agregát krystalického vápence. Mezizrnná hmota obsahuje směs vápenato-hořečnatých karbonátů, oxidů a hydroxidů železa (goethit a limonit) a jílových minerálů, které jsou zastoupeny v různém množství (Dvořák 2001).

Prvním krokem průzkumu stavu kamene byla podrobná vizuální inspekce povrchu jednotlivých bloků za použití bifokální lupy. Stav všech čtyř stropních bloků byl v podstatě velmi podobný – kámen působil nehomogenně, povrchová vrstva byla silně zpráškovatělá, na povrchu byly viditelné krystalky vodorozpustných solí. V některých místech se pak oddělovaly i silnější povrchové krusty o tloušťce cca 5–10 mm. Vedle toho bylo patrné i rozvol-



Obr. 2 Čtyři poškozené vápencové stropní bloky (foto M. Dvořák)

ňování jednotlivých sedimentárních vrstev kamene. Na dvou blocích bylo možné pozorovat vertikální prasklinu přes celou jejich tloušťku.

Analýza vodorozpustných solí

Za účelem lepšího popisu situace bylo ve vzorcích z povrchu jednotlivých kamenných stropních desek provedeno stanovení obsahu vodorozpustných solí, a to pomocí semimikrokvantitativní metody selektivních analytických papírků Merck. Týkalo se hlavních vodorozpustných solí – chloridů, dusičnanů, dusitanů a síranů.

Popis analytického stanovení

Postup: Obsah vodorozpustných solí (chloridů, dusičnanů, dusitanů a síranů) byl stanoven pomocí selektivní analýzy firmy Merck. Získaná data byla porovnána s normou ČSN P 730610-2000 (tab. 2) a směrnicí WTA 4-5-99/D (tab. 3). Výsledky jsou uvedeny v tabulce (tab. 1).

Analytické stanovení bylo provedeno jednak ve čtyřech vzorcích odebraných z povrchu jednotlivých bloků (vzorky číslované B1, B2, B3 a B4 byly odebrány v podobném výškovém profilu asi v polovině boční hrany jednotlivých bloků), jednak z povrchu architrávu v blízkosti praskliny (vzorek B5). Vzorky označené P1–P4 jsou odebrány z jednotlivých pilířů ve výšce cca 1m (číslování ve

směru hodinových ručiček: P1 – severovýchodní až P4 severozápadní).

Vyhodnocení

V analyzovaných vzorcích byla zjištěna pouze přítomnost chloridů a síranů. Dusičnany ani dusitaný nebyly – podobně jako v předchozích analýzách vzorků z této oblasti – nalezeny v žádném z analyzovaných vzorků. Obsah síranů je v případě vzorků B2 a B4 na nízké úrovni. Naopak chloridy byly detekovány ve všech pěti vzorcích, a to u vzorků B1, B2, B3 a B4 v úrovni vysoké a pouze u vzorku B5 z architrávu v úrovni nízké či mírně zvýšené – na základě vyhodnocení podle ČSN, i mezinárodní směrnice WTA. Výsledky analýzy salinity vzorků v podstatě korespondují s analýzami provedenými v rámci předchozích projektů v Abúsíru. V žádném ze stanovení se výsledky výrazně nevymykají očekávání – hlavní složkou vodného výluhu je rozpuštěný uhličitán vápenatý a hlavním problémem je výskyt chloridů, které jsou přítomny u všech analyzovaných vzorků, u některých dokonce ve stupni vysokém až velmi vysokém.

Situace se na různých místech jednotlivých bloků sice může mírně lišit (v závislosti na jejich umístění i předchozí historické expozici, kvalitě a čistotě zásypového písku, intenzitě průsakové povrchové vody i celkové hydrogeologické situaci), ale z vyhodnocení výsledků

Číslo vzorku	dusičnany [% hmot.]	sírany [% hmot.]	chloridy [% hmot.]	dusitaný [% hmot.]
B1	0	0	0,3	–
B2	0	0,1	0,25	–
B3	0	0	0,2	–
B4	0	0,1	0,5	–
B5	0	0	0,09	–

Číslo vzorku	dusičnany [% hmot.]	sírany [% hmot.]	chloridy [% hmot.]	dusitaný [% hmot.]
P1	0	0	0,1	–
P2	0	0	0,1	–
P3	0	0	0,15	–
P4	0	0	0,05	–

Tab. 1 Určený obsah aniontů ve vodném výluhu u jednotlivých vzorků

Stupeň zasolení	chloridy [% hmot.]	sírany [% hmot.]	dusičnany [% hmot.]
nízký	< 0,075	< 0,5	< 0,1
zvýšený	0,075–0,20	0,5–2,0	0,1–0,25
vysoký	0,20–0,5	2,0–5,0	0,25–0,5
velmi vysoký	> 0,5	> 5	> 0,5

Tab. 2 Srovnávací stupeň zasolení dle ČSN P 730610-2000 stupeň zasolení chloridy

Stupeň zasolení	chloridy [% hmot.]	sírany [% hmot.]	dusičnany [% hmot.]
nízký	< 0,2	< 0,5	< 0,1
střední	0,2–0,5	0,5–1,5	0,1–0,3
vysoký	> 0,5	> 1,5	> 0,3

Tab. 3 Srovnávací stupeň zasolení dle směrnice WTA 4-5-99/D



Obr. 3 Přípravné práce před lepením poškozeného architrávu (foto H. Vymazalová)

průzkumu i analýzy vodorozpustných solí je možné stupeň poškození definovat jako vysoký a celkový stav bloků jako havarijní. Konzervace stropních bloků v takovémto stupni poškození je i v optimálních podmínkách velmi komplikovaná, v podmínkách egyptské pouště pak téměř nemožná. Proto bylo i s přihlédnutím k hrozícím bezpečnostním rizikům rozhodnuto o jejich sejmutí a uložení v terénním skladu. Další postup bude navržen po dohodě s egyptskou stranou.

Jiná byla situace u architrávu (vzorek B5). Ten se již při první prohlídce zdál být v nepoměrně lepším stavu, což se potvrdilo i dalším průzkumem. Použitý bílý vápenec byl kvalitnější, oproti stropním blokům z lokálního šedého vápence měl jinou strukturu, byl celkově homogennější s vyšším zastoupením křemičitých složek, nebylo patrné rozvolňování jednotlivých sedimentárních vrstev. Analýza salinity rovněž potvrdila poměrně nízký stupeň přítomnosti vodorozpustných solí – analyzovány byly jen chloridy, a to pouze ve stupni nízkém až středním (cca 0,1 % hmot.). Blok však byl vážně mechanicky poškozen – byl rozlomen vertikální prasklinou na dva hlavní podobně velké kusy a tři menší fragmenty. Oba hlavní kusy architrávu byly navíc posunuty ze své původní polohy o cca 10–15 cm.

Po vyhodnocení průzkumu bylo ve spolupráci s egyptskými kolegy rozhodnuto, že se pokusíme architráv zachránit – zrestaurovat jej, vrátit do přesné původní polohy

a prezentovat jej společně se čtyřmi dochovanými monumentálními pilíři jako součást architektury dvora *in situ* (obr. 3).

Návrh postupu restaurování

Pro navržení optimálního restaurátorského zásahu je jedním z nejdůležitějších faktorů výběr vhodných materiálů. V našem případě byl vedle vhodných vlastností (konsolidační schopnost, stálost, odolnost vůči dlouhodobému působení degradačních vlivů...) respektován i princip kompatibility – podle něj by při restaurátorském zásahu měly být přednostně použity takové materiály, které se ve hmotě dané památky již vyskytují nebo které by svým chemickým složením a látkovou strukturou byly autentickým historickým materiálům památky co nejvíce blízké. V rámci navrhovaného restaurátorského zásahu v případě pilířového dvora hrobky princezny Šeretnebej bylo nutné vyřešit dva hlavní problémy. Prvním byly otázky spojené s opětovným spojením jednotlivých nalezených fragmentů a druhým celková konsolidace jednotlivých vápencových bloků a vhodný způsob povrchové ochrany, který by jim zajistil odolnost vůči působícím degradačním vlivům.

Pro spojení jednotlivých fragmentů byla zvolena varianta propojení jednotlivých kusů čepy vlepenými do předvrtaných otvorů. Při této metodě se do spojovaných fragmentů navrtávají otvory, do nichž se pak vlepejí spojovací čepy. Ty mohou být z různého materiálu o různém průřezu. Od toho se pak odvíjejí výsledné vlastnosti takto realizovaného spoje. Mezi nejčastěji používanými patří ocelové profily různých průřezů, profily ze sklolaminátů a nejnověji karbonové kompozity.

Vláknové kompozitní materiály

Myšlenka současného použití dvou materiálů, jejichž výsledná kombinace výrazně zlepší některé z vlastností, je velmi stará. Již ve starém Egyptě byly používány kompozitní materiály, např. nepálené cihly vyrobené ze směsi jílu (pojivo, matrice) a slámy (výztuž), které měly ve srovnání s čistě jílovými nevypalovanými cihlami daleko lepší mechanické vlastnosti (Vejsražková 2008).

Během 19. století byly k vyztužení zdi již běžně používány ocelové tyče, což v dalším kroku vedlo ke vzniku předpjatého betonu. K největšímu rozmachu ve vývoji kompozitních materiálů a jejich následnému širokému uplatnění dochází až ve druhé polovině minulého století. Termín kompozit je užíván pro materiálovou kombinaci dvou nebo více složek s různými vlastnostmi. Jejich spolužitím dojde k výraznému zlepšení vlastností výsledného produktu. Ze všech možných kombinací dosáhly díky svým vlastnostem největšího využití kompozity tvořené organickou pryskyřicí ztuženou skleněnými, uhlíkovými či organickými vlákny.

Jako pojivo se nejčastěji užívají nenasycené polyestery, vinylestery, případně epoxidy nebo fenolické pryskyřice. Nejběžnější používanými vlákny jsou vlákna skleněná, aramidová (vyráběná z aromatických polyamidů – např. Kevlar® nebo Twaron®) a karbonová. Karbonová vlákna se vyrábějí další úpravou polyakrylonitrilových vláken, při níž působením vysokých teplot dochází nejprve ke

karbonizaci a následně při 2500–3000 °C vzniká grafitická mikrostruktura (Talreja – Manson 2001: 23–57).

První oblastí, kde se kompozitní materiály s pryskyřičnými matricemi užívaly, byl především vojenský průmysl. Až koncem minulého století se po uvolnění informačního embarga začínají kompozitní materiály ve větší míře a s úspěchem používat i v civilních oblastech. Vedle leteckého a automobilového průmyslu nacházejí uplatnění např. ve zdravotnictví, elektrotechnice, stavebnictví a také při restaurování památek. Vláknité kompozitní materiály (*fiber reinforced composites* – FRC) vynikají především svými výbornými mechanickými vlastnostmi, jako je vysoká pevnost a tuhost v poměru k měrné hmotnosti (pevnost kompozitních profilů dosahuje pevnosti nejkvalitnějších konstrukčních ocelí), vysoká odolnost proti působení degračních vlivů a variabilita při výrobě (možnost volby typu, obsahu a struktury vláken, typu a množství pojiva a tvaru profilu, což umožňuje ovlivnění výsledných vlastností) (Jančář 2003: 10–22). Navíc došlo v důsledku zvládnutí výroby a velkého nárůstu produkce ke snížení jejich ceny na úroveň srovnatelnou s tradičními konstrukčními materiály. Na druhou stranu je však třeba při konkrétní aplikaci počítat s tím, že pevnost kompozitů není stejná ve všech směrech a je závislá na směru působení vnějšího napětí (Machek – Sodomka 2008: 12–65).

Lepení architrávu

Před vlastním spojením fragmentů architrávu bylo nutné vrátit jednotlivé rozlomené části do původní polohy. Vzhledem k tomu, že se jednalo o dva bloky o hmotnosti okolo 600–700 kg, bylo k jejich zdvihnutí do původní polohy nutné použít hydraulické zvedáky. Výborně se osvědčily zvedáky z terénních automobilů Toyota Landcruiser. Po vyrovnání obou kusů do původní polohy byly oba bloky zafixovány v potřebné pozici pomocnou konstrukcí z dřevěných trámů a horolezeckých lan (obr. 4).

Jako nejvhodnější spojovací materiál byl vybrán karbonový kompozit s kruhovým průřezem o tloušťce 8 mm. Délka jednotlivých tyčí byla upravena podle hloubky vyvrtaných otvorů. V případě vápencového architrávu jsme zvolili průměr vrtaného otvoru 10 mm a hloubku vrtů minimálně 350 mm do každého ze spojovaných fragmentů. Celkem byly vyvrtány 3 vrty, a to šachovnicově a pod úhlem cca 45°. Vrtání probíhalo bez užití příklepu s maximální opatrností – jednak při něm nesmělo dojít k poškození fragmentů architrávu, jednak musely být obě části vrtů v obou spojovaných fragmentech vedeny pod stejným úhlem, aby po vložení spojovacího čepu nedocházelo k vnitřnímu pnutí ve hmotě kamene. Po vyvrtání byly otvory důkladně vyčištěny stavebním vysavačem – jemný prach po vrtání by totiž mohl působit komplikace při kotvení karbonových tyčí. Vlastní kotvení probíhalo ve dvou krocích. V prvním byl vnitřek otvorů ošetřen velmi zředěným roztokem epoxidové pryskyřice v toluenu v koncentraci cca 5 % hmotnostních – tím došlo ke zpevnění vnitřního povrchu vyvrtaných otvorů a také byl připraven adhezni můstek pro vlastní kotvení, čímž se zvýšila celková výsledná pevnost spoje. Po zaschnutí a vytvrzení tohoto penetračního roztoku byla do otvorů injekční stříkačkou vstříknuta epoxidová pryskyřice a vsazeny karbonové tyče, pokud možno tak, aby byl celý prostor vrtu homogenně vyplněn pryskyřicí bez vzduchových bublin, které by mohly snižovat výslednou pevnost spoje.

Jako adhezivo byla použita epoxidová pryskyřice CHS Epoxy 371 s vytvrzovacím systémem Telalit 0500 na bázi cykloalifatických aminů (výrobce Spolchemie, a. s., Ústí nad Labem), jež má rychlejší průběh síťovací reakce (cca 3–5 minut, ke kompletnímu zesíťování dochází do 24 hodin). Proto bylo nutné vše velmi dobře připravit a pracovat rychle. Lepení probíhalo v ranních hodinách, kdy se teplota pohybovala okolo 20 °Celsia a sluneční svit nebyl ještě příliš intenzivní. Se zvyšující se teplotou se totiž zvyšuje i reakční rychlost a doba zpracovatelnosti materiálu by mohla být příliš krátká. Spojený architráv byl

Obr. 4 Provizorní zajištění částí architrávu (foto H. Vymazalová)



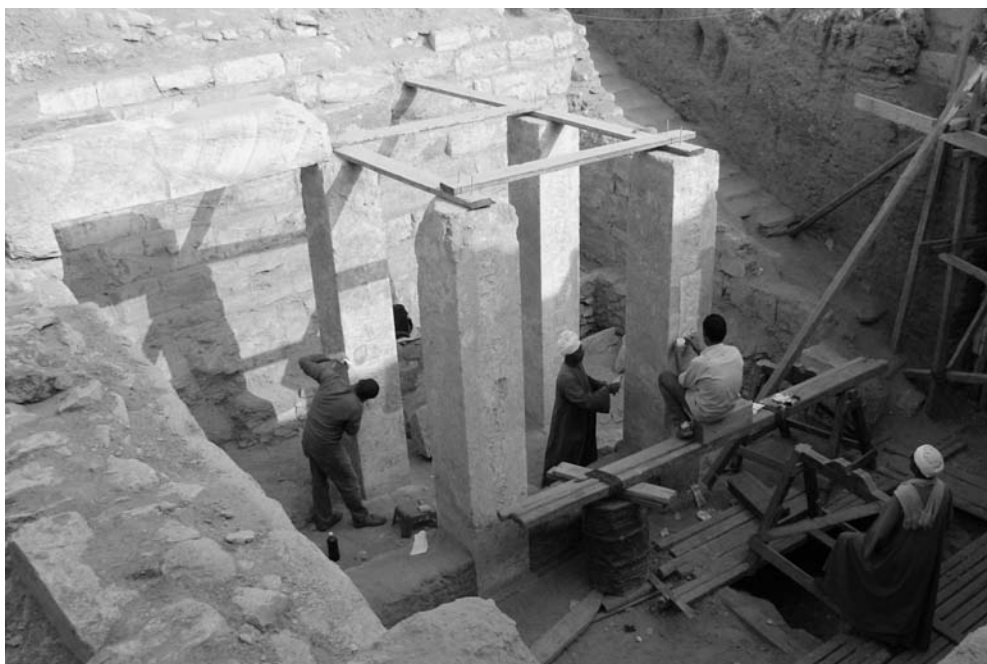


Obr. 5 Architráv po slepení a provizorním zajištění (foto M. Dvořák)

z bezpečnostních důvodů ze spodní strany podepřen a zafixován výsuvnou ocelovou lešenářskou stojkou s nastavitelnou výškou (obr. 5). Ta byla odstraněna až poté, co byl průběh polymerace epoxidového adheziva zcela završen. Následně byla prasklina vytmelená vápenným tmelem s obsahem plniva podobného jako materiál, z něhož je vyroben architráv. Jako základ tmelu byl použit materiál VAPO pojivo, což je komerčně vyráběná směs vápenného hydrátu, hlinitokřemičitanové složky a dalších přísad, které zlepšují užité vlastnosti hmoty (český výrobce Aqua Bárta). Do něj bylo přidáno plnivo z jemně nadrceného vápence podobných vlastností, jaké má vápence architrávu, a potřebné množství vody.

Celková konzervace vápencových pilířů v hrobovém komplexu princezny Šeretnebtaj

Druhým cílem restaurátorského zásahu v pilířovém dvoře hrobového komplexu princezny Šeretnebtaj byla celková konzervace čtyř stojících pilířů (obr. 6). Po provedení podrobného vstupního průzkumu bylo zřejmé, že materiál všech čtyř pilířů je v poměrně dobrém stavu – vápence se zdál být víceméně kompaktní, bez výraznějších povrchových defektů. Podobně i výsledky analýzy přítomnosti vodorozpuštěných solí ukázaly pouze výskyt chloridů, a to v nízké úrovni. Proto nebylo nutné provést celkové odsolování. Povrch pilířů byl však silně znečištěn bahnem



Obr. 6 Egyptští restaurátoři čistí jednotlivé pilíře ve dvoře princezny Šeretnebtaj (foto H. Vymazalová)

a dalšími nečistotami, jednotlivé hieroglyfické značky, provedené technikou zahloubeného reliéfu, byly nečistotami zcela vyplněny. Proto bylo v první fázi nutné provést kompletní čištění celého povrchu pilířů. Po provedení zkoušek čištění byla zvolena technika kombinující suchou a mokrou cestu. Nejprve tedy byly nečistoty odstraněny mechanicky s kombinovaným použitím skalpelů, zubolékařských nástrojů a štětců různé tvrdosti. Poté byla použita destilovaná voda s přídavkem 1 % neionogenního povrchově aktivního tenzidu pro lepší smáčení povrchu pilířů a usazených nečistot. Jako vhodný způsob aplikace se ukázaly jednak buničinnové zábaly a dále i sprejování povrchu jemnou vodní mlhou.

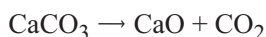
Testy byly prováděny na pilíři P2 a vyhodnocení bylo uskutečněno společně s vedoucím restaurátorem sakkárského inspektorátu Ašrafem Júsem. Po vyhodnocení testů a stanovení optimálního postupu přistoupili k čištění všech čtyř pilířů egyptští kolegové Osama Saber a Ahmad Abdel Nabi.

Konsolidace degradovaného vápence

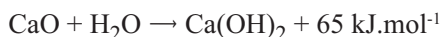
Po kompletním vyčištění povrchu bylo patrné, že je mírně degradován – povrchová vrstva vápence práškovatá a odpadává. Proto bylo rozhodnuto o aplikaci vhodného konsolidantu. Na základě předchozích zkušeností byla zvolena aplikace některého z konsolidantů na bázi vápna. Jedná se o materiál přirozeně se vyskytující ve struktuře tohoto kamene, který při výběru vhodného produktu a vhodné technologie aplikace zajistí dostatečně hluboký průnik konsolidantu v potřebném množství s potřebným zpevňujícím efektem. Zpevněný kámen si uchová dobrou paropropustnost a povrch nebude pouze uzavřen pevnější krustou.

Postup přípravy a karbonatace vápna

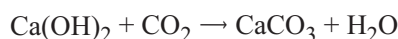
Vápno je připravováno pálením vápence, kdy vzniká oxid vápenatý a oxid uhličitý:



Vlastnosti vápna určuje mimo jiné jeho mikrostruktura, která závisí na teplotě výpalu a ovlivňuje jeho aktivitu, rychlost hašení vápna, vydatnost a plasticitu. Dalším pochodem je hašení vápna, což je v podstatě hydratace oxidu vápenatého za vzniku hydroxidu vápenatého:



Způsob provedení hydratace oxidu vápenatého, tj. hašení, ovlivňuje výsledné vlastnosti hašeného vápna. Vzhledem k tomu, že krystalové mřížky oxidu a hydroxidu vápenatého nemají stejnou velikost, vzniká při postupné hydrataci zrn napětí, které rozdučuje částice vápna na velmi jemné částice hydroxidu. Hydroxid vápenatý má charakter hydrogelu, který obsahuje více vody, než odpovídá vzorci Ca(OH)_2 . Odležením vápenné kaše dojde k ustavení adsorpční rovnováhy, která má význam pro reaktivitu hydroxidu a plasticitu kaše. Kvalitní vápenná kaše, tj. dobře vyhašená a odleželá vápno, má konzistenci změkklého másla, výbornou plasticitu a vaznost. Zpevňovací proces vzdušného vápna se nazývá karbonatace, při níž vzniká nerozpustný uhličitán vápenatý CaCO_3 . Chemickou reakci lze popsat rovnicí:



Proces karbonatace vápna je pomalý a závisí na koncentraci oxidu uhličitého v okolním vzduchu, jeho parciálním tlaku, relativní vlhkosti vzduchu (RH) a teplotě. Je-li $\text{RH} < 50\%$ nebo $\text{RH} > 95\%$, reakce probíhá velmi pomalu. Průběh karbonatace vápna také negativně ovlivňuje nízká teplota okolí (Rovnaníková 2000).

Nanodisperze hydroxidu vápenatého

Termínem nanomateriály jsou obecně nazývány takové materiály, jejichž částice mají velikost minimálně v jednom nebo více rozměrech v rozsahu 1–100 nm. (1 nm = 10^{-9} m neboli 0,000000001 m).

Pro lepší představu, rozměry molekuly vody jsou řádově 0,1 nm, rozměry virů kolem 100 nm a rozměry bakterií kolem 1000 nm. Nanomateriály jsou v současnosti s úspěchem užívány v mnoha oblastech – ve zdravotnictví, elektrotechnice, potravinářství a kosmetice, textilním průmyslu, strojírenství i ve stavebnictví. V oblasti péče o památky se nanomateriály používají k několika účelům: z důvodu schopnosti biocidního působení některých nanočástic kovů (např. stříbro nebo měď). Disperze uhličitánů (vápenatého, hořečnatého, barnatého atd.) jsou dále užívány pro odkyselování papíru a pro preventivní vytváření tzv. alkalické rezervy v papíru.

Dalším příkladem použití nanodisperzí je tvorba silně hydrofobních či naopak hydrofilních povrchů, které mohou sloužit třeba k ochraně historických fasád před graffiti, příp. dodat pláštům budov tzv. samočistící efekt. Podobně jsou nanoemulze organických rozpouštědel ve vodě užívány k šetrnému čištění povrchů a odstraňování nežádoucích látek. Nejrozšířenější je však použití vápenných nanodisperzí jako konsolidantů nástěnných maleb, malt, omítek i některých druhů kamenů. Nanodisperze hydroxidu vápenatého jsou připravovány poměrně složitými chemickými reakcemi v alkoholech (ethanol, propanol...). S úspěchem se užívají tam, kde je třeba do materiálu památky vpravit větší množství konsolidantu. Dosud používaná vápenná voda obsahuje velmi malé množství aktivní složky (rozpuštěnost hydroxidu vápenatého ve vodě je cca 1,6 g v 1 litru při 20 °C), a proto je nutné její aplikace mnohonásobně – někdy v 50–60 cyklech – opakovat. Naproti tomu komerčně vyráběné nanodisperze v alkoholu obsahují vápna daleko více (až 50 g Ca(OH)_2 v 1 litru).

Další variantou tohoto zpevňovacího systému jsou nanodisperze hydroxidu barnatého či hořečnatého, které jsou však zatím teprve ve stadiu laboratorního testování.

Dalším důležitým hlediskem je distribuce velikostí částic hydroxidu vápenatého – vodné roztoky Ca(OH)_2 dosud běžně užívané pro konsolidaci (vápenná voda nebo vápenné mléko) mají příliš velké částice v řádech jednotek až desítek mikrometrů. Tyto roztoky jsou použitelné pro zpevňování porézních materiálů s větší velikostí pórů (v řádech desítek až stovek mikrometrů), kdy mohou proniknout hlouběji do struktury zpevňovaného materiálu.

V případě zpevňování materiálů s užšími póry, mezi něž patří i některé druhy vápence a opuky, které mají velikost pórů často jenom okolo desetin mikrometru, musí být částice konsolidantu daleko menší – v odborné literatuře je doporučována velikost 10–20 nm. Tuto podmínku splňují

nanodisperze. Připravit takové disperze je však technologicky nepoměrně složitější. Dalším důležitým faktorem je i stabilita disperzí a jejich odolnost vůči aglomeraci. V případě, že nejsou nanodisperze dostatečně odolné, se může stát, že se nanočástice shlukují, aglomerované nanočástičky pak neproniknou do potřebné hloubky a k očekávané konsolidaci nedojde (Rathouský 2012).

Konsolidace pilířů

Pro konsolidaci vápencových pilířů ve dvoře hrobového komplexu princezny Šeretnebtj byl z komerčně dostupných produktů zvolen prostředek Nanorestore® (nanodisperze hydroxidu vápenatého v isopropanolu o velikosti částic v řádu desítek nm, prodává italská firma CTS). Tento prostředek byl zvolen jednak na základě dobrých výsledků z provedených orientačních testů na úlomcích vápence podobné charakteristiky, jednak díky své dostupnosti.

Aplikaci prováděli egyptští kolegové klasickou metodou nátěru (opakovaně cca 4–5 nátěrů bez zaschnutí). Poté byl nevsáknutý roztok a bílý povrchový zákal očištěn vlhkou houbou namočenou v destilované vodě. Po vyschnutí zpevněného povrchu je možné konstatovat, že došlo k potřebnému zpevnění bez změny vzhledu povrchu vápence. Stejně byl ošetřen i architráv.

V rámci dalších prací uvažujeme i o vyzkoušení nanodisperzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ od dalších výrobců. Ty se liší velikostí a distribucí vápenných částic, celkovým obsahem hydroxidu vápenatého a i dalšími použitými materiály (např. Ca-LoSiL®). V následujících testech by měly být posouzeny i jiné možné vlivy, které by mohly negativně ovlivnit úspěch použití vápenných nanodisperzí (vliv přítomnosti vodorozpustných solí ve zpevněném materiálu, vliv teploty a relativní vlhkosti v průběhu aplikace atp.).

Posledním krokem této etapy restaurování pilířů bylo provedení stavební přípravy pro konstrukci budoucího zastřešení pilířového dvora a osazení provizorního zastřešení, které dočasně ochrání vápencové pilíře před degradačními vlivy, zejména před slunečním žářem a občasnými dešti.

Závěr

Z dosavadního vyhodnocení restaurátorských zásahů provedených v rámci uplynulé archeologické sezóny v jižním Abúsíru lze konstatovat, že nově použité materiály splnily naše původní očekávání. Spoj architrávu, realizovaný třemi čepy z karbonového kompozitu, zatím nejeví ani po šesti měsících žádné znaky poškození. Podobně i vápencové pilíře jsou po restaurátorském zákroku stabilizované, jejich povrch se zdá být kompaktní a dostatečně zpevněný. V rámci prací příští etapy by bylo žádoucí definitivně vyřešit zastřešení pilířového dvora, aby mělo dostatečnou ochrannou funkci a účinně chránilo cennou památku před působením degradačních vlivů. Architektonická koncepte i stavební řešení zastřešení jsou v současné době projednávány ve spolupráci s dalšími odborníky a egyptskými zástupci Nejvyšší rady pro památky.

Poděkování:

Chtěl bych na tomto místě poděkovat RNDr. L. Kopecnému za konzultace z oblasti geologie a Ing. D. Melzerovi za spolupráci při užití karbonových kompozitů.

Literatura:

- Dvořák, Martin: 2001 „Přírodovědný průzkum a konzervace umělecké výtoby Hetepiho hrobky“, in: Hašek, Vladimír – Nekuda, Rostislav – Unger, Josef (eds.). *Ve službách archeologie III. Sborník k 75. narozeninám Prof. RNDr. Jana Jelínka*, Brno – Nitra: Muzejní a vlastivědná společnost v Brně, s. 40–46.
- 2005 „Restaurování práce v objektu hrobky Iufaa v severním Abúsíru“, in: Hašek, Vladimír – Nekuda, Rostislav – Ruttkay, Matej (eds.). *Ve službách archeologie VI. Sborník věnovaný 70. narozeninám PhDr. Dariny Bialekové a 60. narozeninám Prof. PhDr. Josefa Ungera, CSc.*, Brno: Muzejní a vlastivědná společnost v Brně, s. 509–514.
- Jančář, Josef: 2003 *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*, Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická.
- Machek, Václav – Sodomka, Jaromír: 2008 *Nauka o materiálu. 4. část. Polymery a kompozity s polymerní maticí*, Praha: Nakladatelství ČVUT.
- Rathouský, Jiří: 2012 „Nanovápno pro konsolidaci porézních materiálů – principy, mechanismy“, in: Kotlík, Petr (ed.). *Nanomateriály v památkové péči*, Praha: Národní technické muzeum, s. 23–31.
- Rovnaníková Pavla: 2000 „O vápně“, KEIM Info magazín 1, <http://www.keim.cz/info/00-1/info1.htm>.
- Talreja, Ramesh – Manson, Jan-Anders E.: 2001 *Polymer matrix composites: a comprehensive composite materials publication*, Amsterdam: Elsevier.
- Tvrdidlo TELALIT 0500 – technický popis, Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a. s., Ústí nad Labem, <http://www.spolchemie.cz/produkty-spolchemie.aspx>.
- Tyčová kompozitní výztuž s kruhovým průřezem Prefen – technický popis PREFE KOMPOZITY, a. s., <http://www.prefa-kompozity.cz/>.
- Vejražková, Ivana: 2008 „Plasty pro stavebnictví a architekturu 7 – Polymerní vláknové kompozity“, http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-7_7_vlUoknitUn_kompozity.pdf.
- Vymazalová, Hana – Dulíková, Veronika: 2012 „O princezně Šeretnebtj“, *Pražské egyptologické studie* 9, s. 10–17.

Abstract:

New materials used for conservation of monuments in Abusir

The author describes new possibilities applied in the conservation of valuable archaeological artefacts from the excavations of the Czech Institute of Egyptology in Abusir South uncovered during the archaeological season 2012–2013. Two hi-tech materials were used to conserve architectural artefacts from the tomb complex of Princess Sherebtjty – carbon composites were applied to reinforce the joints of re-attached broken parts of a limestone architrave and a lime nanodispersion was used to consolidate degraded parts of limestone pillars.