

## Geopolymerní beton (také starověký materiál?)

František Škvára, Pavel Svoboda, Josef Doležal, Zdeněk Bittnar, Vít Šmilauer, Lubomír Kopecký, Rostislav Šulc

### Abstrakt

V práci je uveden souhrn poznatků o možnosti použití „betonářské“ technologie při stavbách egyptských pyramid (Davidovitsova hypotéza). Publikované poznatky na jedné straně podporují tuto hypotézu, jiné ji striktně odmítají. Základním nedostatkem při posuzování hypotézy o použití „betonářské, vytvářecí“ technologie (geopolymery, vápenná pojiva) je nedostatek relevantních dat z dostatečného množství vzorků z pyramid a dalších staveb. Čeští egyptologové nenalezli při svých dlouholetých vykopávkách v Egyptě náznaky použití „betonářské“ technologie ve staroegyptských stavbách (např. otisky bednění). Starověké stavební materiály, pokud byly vytvořeny lidskou rukou, představují perspektivu materiálů pro fixaci toxických látek s dlouhodobou stabilitou.

Ústav skla a keramiky VŠCHT a Fakulta stavební ČVUT v Praze provádí již řadu let výzkum alkalicky aktivovaných materiálů (od roku 1973). V současné době je pozornost zaměřena na materiálový a technologický výzkum geopolymerních materiálů, zejména betonů. Jsou sledovány geopolymerní materiály na bázi odpadního, převážně hnědouhelného, popílku. Dosažené výsledky z našich výzkumných projektů ukazují, že geopolymerní beton je velmi odolný a ekonomicky výhodný materiál. Naše souborné výsledky dosažené při výzkumu geopolymerních betonů byly publikovány v řadě sdělení<sup>1,2</sup> a byly také patentovány. Další výzkum se soustřeďuje také na negativní stránky geopolymerního betonu, jako je tendence ke tvorbě výkvětů.

Při studiu trvanlivosti geopolymerních betonů vyvstává otázka jejich dlouhodobých vlastností (v horizontu více než staletí). U materiálů na bázi portlandského cementu máme k dispozici základní dlouhodobé materiálové údaje ze středověkých a starověkých staveb (cca 2000 let). Tyto údaje se vztahují k materiálům jejichž hydratační produkty jsou srovnatelné s portlandským cementem. Jedná se o materiály, kde jako pojivo bylo použito vysocehydraulické vápno či směsný románský cement.

Davidovits<sup>3,4</sup> vyslovil hypotézu o použití geopolymerních pojiv při stavbě starověkých (zejména egyptských staveb), tedy více než 4000 let starých. Podle jeho názoru byla při stavbě egyptských pyramid použita „betonářská“ technologie při ukládání geopolymerních směsí (s vápencovým plnivem) do bednění, které postupně vytvářelo jednotlivé bloky. Svoji hypotézu opírá o rozbory nápisů na staroegyptských stélách, kde se domnívá, že zobrazené hieroglyfy je třeba interpretovat spíše technickým výkladem než literárním (jako je tomu činěno dopo-

sud). Tyto úvahy spolu s interpretací analýz (mikroskopie, IR a NMR spektroskopie) nečetných vzorků ze starověkých egyptských staveb byly publikovány v pracích<sup>3,4</sup>. Tato interpretace byla také potvrzena v práci Demortiera<sup>5</sup>, který vyslovil názor, že „betonářská, vytvářecí“ technologie byla známa ve starověku v oblasti Káhiry. Demortier své závěry vyslovil na základě studia makroskopického vzhledu bloků pyramidy (jejich nestejně pórovitosti v horní a dolní části bloků) a na základě rtg. a NMR analýz. Analýzy prováděl na několika malých úlomcích z pyramid. Některé staroegyptské výjevy interpretuje jako obrazový popis „betonáře“ při stavbě pyramidy.

V práci Barsouma a Ganguly<sup>6</sup> byly provedeny analýzy vzorků (celkem 5) z různých egyptských pyramid vč. Cheopsovy pyramidy. Pro srovnání byly také analyzovány přírodní materiály (vápence) z lomů, které sloužily jako zdroj surovin při stavbě pyramid. Analýzy byly prováděny petrograficky a dále bodovou analýzou na ESEM. Na základě svých výsledků vyslovili názor, že je možné uvažovat o použití „betonářské“ technologie při stavbě pyramid až po provedení výrazně většího počtu analýz.

Další práce<sup>7-9</sup> vyslovují naprosto negativní názor na použití geopolymerních pojiv ve starověkých stavbách. Tyto práce se opírají o analýzy vzorků pyramid, které jim poskytlo British Museum a z t.zv Lauerovy sbírky. Freestone a Middleton<sup>7</sup> provedli podrobnou analýzu vzorků z Cheopsovy pyramidy ((British Museum) optickou a elektronovou mikroskopií (s bodovou analýzou), rtg.difrakcí a IR spektroskopií. Campbell<sup>8</sup> se zaměřil na petrografické zkoumání vzorků z Cheopsovy pyramidy a hornin (především vápenců) z lomů, které byly použity při stavbě pyramid. V práci Jana<sup>9</sup> je provedeno podrobné petrografické a mikroskopické (optická a elektronová mikroskopie, rtg. difrakce) studium vzorků z pyramidy z Khufu a vzorků z Lauerovy sbírky, přírodního vápence ze staroegyptského lomu a dále vzorků syntetického vápencového geopolymery připraveného Davidovitsem. Badatelé<sup>7-9</sup> nenalezli ve vzorcích žádné stopy po pojivových geopolymerních fázích a tyto vzorky odpovídají přírodnímu vápenci, který byl těžen v Egyptě. Našli také zásadní rozdíl mezi vápencem z pyramid a syntetickým vápencovým geopolymery připraveným Davidovitsem. Vyslovují ve svých pracích<sup>7-9</sup> názor, že hypotéza o „betonářské“ technologii při stavbě egyptských pyramid musí být potvrzena systematickým výzkumem na věrohodném souboru vzorků a dat.

V zájmu objektivity je však třeba říci, že badatelé<sup>6-9</sup> nezkoumali vzorky z pyramid ani přírodní materiály pomocí NMR spektroskopie (Si, Al, Na) v pevném stavu.

Český egyptologický ústav Filosofické fakulty University Karlovy v Praze<sup>10</sup> provádí řadu let (od roku 1960) vykopávky a výzkum staroegyptských staveb (pyramidy, šachtové hroby, hrobky vysokých úředníků a členů královské rodiny) v lokalitách Abúsír u Káhiry. Při

výzkumech staro-egyptských staveb nebyly nalezeny náznaky použití „betonářské“ technologie, např. ve formě otisků bednění na částech staveb. Byly však nalezeny otisky lidských prstů v omítkách (vápenných) nebo v hliněných (nepálených) cihlách. Jakési přiblížení staroegyptských materiálů k betonu bylo nalezeno v vápenných omítkách a vápenných výplňových vrstvách v sarkofágu, které kromě vápenného pojiva obsahovaly i oblázky. Podle nalezených střeptů se tyto vápenné malty a výplňové vrstvy přepravovaly do nitra hrobek (v případě Iufaovy šachtové hrobky do hloubky 21 metrů) ve velkých, až 60 cm vysokých keramických džbánech zřejmě v poměrně řídkém stavu. Střepy takových nádob se zbytky řídké malty nebo vápenné výplně našly na několika místech i v jiných hrobkách, takže teoreticky si skutečně lze představit něco jako „betonárku“ na poušti v blízkosti hrobky, kde se tyto hmoty připravovaly (např. jen v případě výplně Iufaova sarkofágu se potřebné množství pohybuje odhadem v řádu desetin krychlového metru, a zdá se, že tato výplň byla vylita víceméně najednou). Není vyloučeno, že i tento postup, resp. následné přenášení malty nebo takového materiálu je v egyptských reliéfech zachycen. Při stavbě pyramid (při dopravě kamenných bloků) byly používány jakési sáně naložené kamenným kvádrem a tažené zřejmě otroky. Na těchto sáních stál otrok, který vyléval do trasy sání z nádoby jílovitou kaši, která tvořila kluznou vrstvu pro pohyb po dopravní trase. Tato kaše také tvořila ložnou vrstvu vodorovných spár, včetně následného zalití svislých spár. V těchto spárách se potom mohli najít i vlasy, jak se o tom zmiňuje Davidovits.

Takže závěrem tohoto sdělení musíme konstatovat, že *“není jasné, jak staří Egypťané dostali na vrchol pyramidy poslední tunový blok...”* a že další výzkum v této oblasti je velmi nutný.

Je třeba otevřeně říci, že pokud by se našly starověké materiály (geopolymery, či materiály na vápenaté bázi) připravené lidskou rukou před tisíci lety, pak jsou to materiály vhodné pro fixaci vysoce toxických odpadů, především jaderných odpadů. U solidifikátů s fixovaným jaderným (radioaktivním) odpadem se vyžaduje stabilita v horizontu tisíciletí. Hledáme tedy odpovědi na otázky moderní doby (perspektivy jaderné energetiky) v šeru tisíciletí.

This study was part of the research project Czech Science Foundation Grant 103/08/1639 *“Microstructure of inorganic aluminosilicate polymers”* and CEZ:MSM 6046137302: *“Preparation and research of functional materials and material technologies using micro- and nanoscopic methods”*.

## References

1. Doležal J., Škvára F., Svoboda P., Kopecký L., Pawlasová S., Lucuk M., Dvořáček K., Beksa M., Myšková I., Šulc R.: „Concrete based on fly ash geopolymer“, Proc. 16.Intern. Baustofftagung IBAUSIL 2006, Band 1 pp. 1-1079 - 1-1086
2. Škvára F., Kopecký L., Němeček J., Bittnar Z.: „Microstructure of geopolymer materials based on fly ash“, Ceramics - Silikáty 50(4) 208-215 (2006)
3. Davidovits J, Morris M.: „The pyramids. A enigma solved“, Hippocrene N.Y. Books, 1988
4. Davidovits J.: „Egyptian made-made stone statues in 200 B.C.“, Proceedings „Geopolymer 99, St.Quentin 321-348 (1999)
5. Demortier G.: „PIXE, PIGE and NMR study of the masonry of the pyramid of Cheops at Giza“, Nucl.Instr.Methods Phys.Research B223, 98-109(2004)
6. Barsoum M.W., Ganguly A.: „Microstructural evidence of reconstituted limestone block in the great pyramids in Egypt“ J.A.Ceram.Soc. 89, 3788-3796 (2006)
7. Freestone I.C., Middleton A.P.: „Natural origin of casing stone from the pyramid of Cheops“, Proc. Intern.Conf.Cement Microsc. 29th, 289-292 (2007)
8. Campbell D.H.: „Geologic origin of Egyptian pyramid blocks and associated structures“, Proc. Intern.Conf.Cement Microsc. 29th, 268-288 (2007)
9. Jana D.: „Evidence from detailed petrographic examinations of casing stones from the great Pyramid of Knufu, a natural limestone from Tura, and man-made (geopolymeric) limestone“, Proc. Intern.Conf.Cement Microsc. 29th, 207-266 (2007)
10. Bareš L.: Český egyptologický ústav, Filosofická fakulta University Karlovy v Praze, soukromé sdělení (2008)

---

František Škvára

Department of Glass and Ceramics, ICT Prague, CZ-166 28 Prague 6, Technická 5, Czech Republic, e-mail: [skvaraf@vscht.cz](mailto:skvaraf@vscht.cz)

Zdeněk Bittnar, Vít Šmilauer, Lubomír Kopecký

Czech Technical University in Prague, Department of Structural Mechanics, CZ-166 29 Prague, Thákurova 7, Czech Republic

Pavel Svoboda, Josef Doležal, Rostislav Šulc

Czech Technical University, Faculty of Civil Engineering, Dept. of Building Technology, CZ-166 29 Praha 6, Thákurova 7, [Svoboda@sv.cvut.cz](mailto:Svoboda@sv.cvut.cz)