

Ing. Kamil Souček, RNDr. Lubomír Staš, CSc., Doc. Ing. Richard Šňupárek, CSc.
Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava Poruba, tel.: +420 596 979 111,
E-mail: soucek@ugn.cas.cz, snuparek@ugn.cas.cz, stas@ugn.cas.cz,

Ing. Tomáš Hanzlíček, Ing. Michaela Steinerová, Doc. RNDr. Pavel Straka, DrSc.
Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8,
tel: +420 266 009 267-8, E-mail: hanzlicek@irms.cas.cz

KONDENZOVANÉ SYSTÉMY ODPADOVÝCH ALUMINIUM-SILIKÁTŮ A JEJICH MOŽNOSTI VYUŽITÍ V INJEKTÁŽNÍM PROCESU.

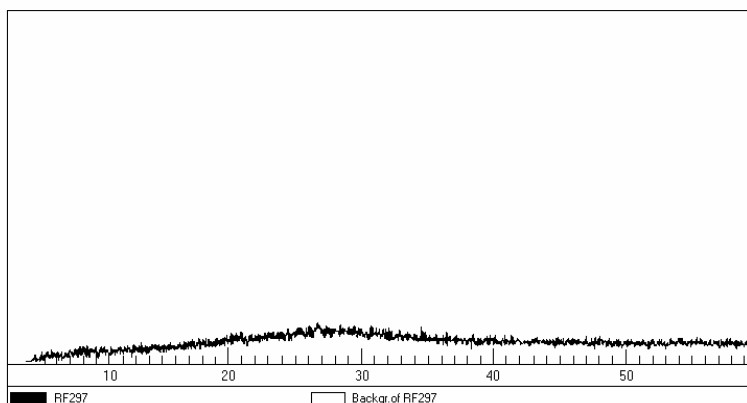
Anotace: In the field of the raw material exploitation, a huge amount of wastes of ceramic kaolinitic clays has currently been recognized. Metallurgy also produces large wastes of high furnace slag. These waste materials are suitable for conversion to solid materials that are chemically-stable though the sol-gel reaction of aluminum-silicates. The low temperature inorganic synthesis of the aluminum-silicates has been studied for several years in the Laboratory of the Beneficiation and Treatment of Raw Materials of the Institute of Rock Structure and Mechanism of the Academy of Science of the Czech Republic. This paper shows the first results of obtained materials on a laboratory scale. In addition, it deals with the results of experimental tests for the materials utilised in grouting technology. The work was supported by project No. S3086351 and No. 3046004 within the framework of the Program supporting focused research and development at the Academy of Science of the Czech Republic.

Úvod

V minulosti i současné době existují jak v oblasti těžby a zpracování keramických surovin kaolinitického typu, tak např. v hutním průmyslu (struskové materiály) i při využití fosilních paliv (popílky a popely) značné objemy odpadových materiálů. Mnohé z těchto druhotných surovin však mohou být na základě nového pohledu na chemismus těchto látek mimořádně významným zdrojem nových materiálů. Z výše uvedených odpadových materiálů lze připravit pevné anorganické polymerní materiály, které vznikají ze soustav sol-gel aluminium-silikátů metodou studené anorganické polymerace. Příspěvek pojednává o výsledcích využití těchto anorganických materiálů v injeztážní technologii v laboratorním měřítku, který navazuje na výzkum provedený v dalších oblastech aplikace tak, jak je již několik let studován pracovníky Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, kteří se zabývají výzkumem těchto anorganických polymerních materiálů.

Způsob zpracování odpadových aluminium-silikátů

V současné době je cílem snah řady laboratoří a výzkumných ústavů nalézt způsoby zpracování stávajících anorganických odpadů na bázi aluminium-silikátů netradičními způsoby, především použitím studených anorganických syntéz LTS (Low Temperature Synthesis)⁽¹⁾. Tyto metody využívají specifických polymerizačních vlastností křemíku⁽²⁾ a poznání, že vhodnou kombinací SiO₂ a Al₂O₃ lze vytvořit pevný anorganický polymer při laboratorní teplotě a tlaku. Bylo ověřeno, že dvojvrstvý jílový minerál kaolinitického typu je schopen vytvářet anorganické polymerní prostorové sítě za vzniku nových pevných látek. Tím se tyto metody zásadně liší od klasických kombinací aluminium-silikátových vazeb, vznikajících při teplotách pálení od 1000°C pro cihly až po 1700°C pro speciální druhy keramiky.



Obr. č. 1 Křivka XRD analýzy

Získané typy pevných látek jsou amorfní, jak vykazuje XRD křivka (viz. Obr. č.1) (rentgenová difrakční analýza), vylučující výskyt krystalických látek a mají řadu překvapivých vlastností:

- jsou zásadně nehořlavé a neuvolňují v žáru žádné zplodiny,
- mají minimální délkové a objemové smrštění,
- jsou nerozpustné ve vodě,
- jsou odolné proti náhlým změnám teploty.

Vznikající pevné látky anorganického polymeru jsou vytvářeny ze soustavy sol-gel. Prostředím reakce je voda, která při procesu solidifikace pomalu a postupně odchází. Vliv odcházející vody má za následek otevřenou pórovitost mezzopórů (velikosti mezi 20 - 25 nm) v rozsahu 6 - 15%.

Charakteristika materiálů použitých v laboratorním výzkumu a možností použití odpadových aluminium-silikátů v injektážním procesu

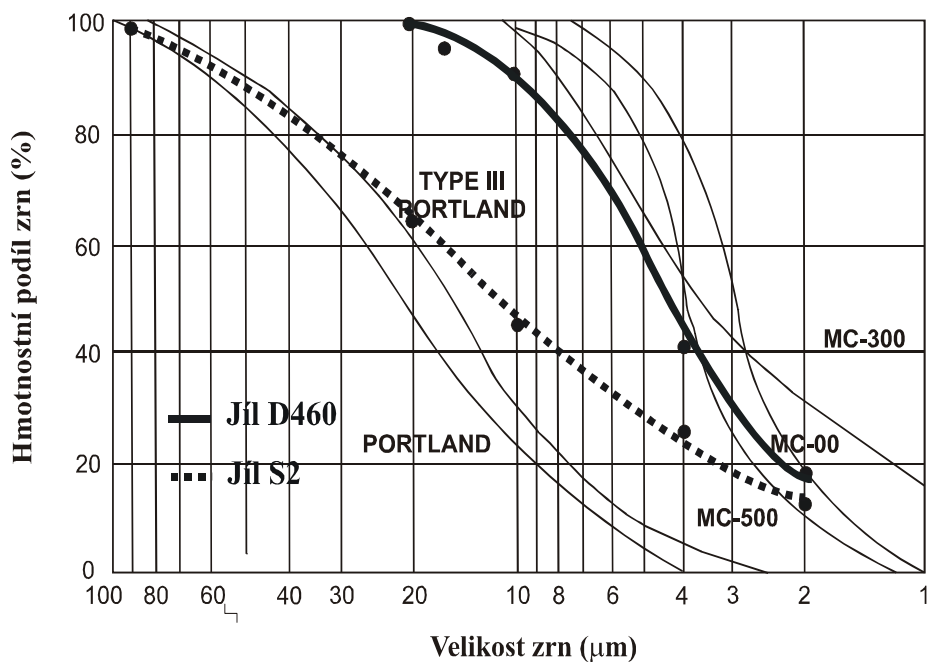
V laboratorním výzkumu byly použity dva typy anorganických polymerních materiálů pro ověření chování těchto materiálů v injektážním procesu. Materiály byly připraveny konverzí z odpadových jíílů D460 a S2 (testované materiály jsou dále označovány D460 a S2) na bázi kaolinitu získaného z těžby a zpracování keramických surovin. Materiál S2 je jílovým kaolinitickým odpadem z těžby kaolinitických pískovců a obsahuje 38-40% jemného křemičitého písku o velikosti do 100 μm . Pro keramické účely není využíván, protože obsah Fe_2O_3 převyšuje normované množství barvicích oxidů. Vedle kaolinitu tento převážně kaolinitický materiál obsahuje malé množství smektitu. Základní příprava materiálu je objasněna v [3], kde je popsán způsob aktivace jílového minerálu. Druhým testovaným materiálem je materiál D460 pod označením RON, jedná se o jemný odpadový podíl lupkového prachu z původních kaolinitických jíílů. Tento jílový materiál neobsahuje prakticky žádný volný SiO_2 a má dlouhodobě velmi standardní složení.

Příprava jílové suroviny spočívá v každém případě ve vysušení a dehydroxylaci. Podle obsahu dehydroxylovaného kaolinitického jílu je aktivovaný jíl hydrolyzován alkáliemi tak, aby bylo dosažen stav, kdy nejdříve vznikají monomery $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ a $[\text{OSi}(\text{OH})_3]^-$. Jejich prostorová polymerace je iniciována zásaditou reakcí disperze ve stavu sol-gel, kdy se následnou reakcí monomery propojují na dimery, trimery a dále na mnohočetné polymerní řetězce za vzniku prostorové sítě. Po 1 hodině od počátku míchání se postupně zvyšuje viskozita disperze až do vzniku pevné látky v celém původním objemu. Negativní náboje soustavy aluminium-silikátové sítě jsou vyrovnávány alkalickými kovy.

Při odpovídajících poměrech reagujících složek a vody je při zachování odpovídající kinetiky míchání směsi dosaženo vytvrzení celého objemu za 12 – 24 hodin při laboratorní teplotě a tlaku. Viskozita thixotropní disperze během míchání odpovídá cca 1000 až 3000 mPa.s.

Zkoumané materiály připravené pro účely injektáže mají charakter jemnozrnných suspenzí. Na obrázku č. 2 jsou znázorněny zrnitostní křivky pevné fáze obou testovaných materiálů ve srovnání s běžně používanými portlandskými a ultrajemnými cementy (MC 100, 300 a 500), používanými v injektážní praxi dle Henna ⁽⁴⁾. Je zřejmé, že z pohledu granulometrického složení jsou studované materiály srovnatelné s cementy, používanými v cementových suspenzích k injektážním účelům.

U nesoudržných zemin pro určení injektovatelnosti můžeme vycházet z výsledků zrnitostní analýzy injektovaného prostředí a injekční směsi. Ze zrnitostních křivek se určí u zeminy průměr zrna D_{15} při 15% podílu hmotnosti. U injektážní směsi rovněž určíme průměr zrna, ale d_{85} při 85 % podílu, resp. d_{95} při 95% podílu. Kritérium je pak stanoveno jako podíl průměru zrn D_{15} a d_{85} , který musí být větší než 20. Hodnota 20 představuje dle Verfela ^[5] minimální požadavek, aby se zrna směsi dostala do injektovaného prostředí. Injekční směs proniká dobře do injektovaného prostředí při hodnotě cca 50. Uvedené kritérium vyhovuje především suspenzím na bázi jílu.



Obr. č. 2 Zrnitostní křivka testovaných materiálů

Henn ve své monografii ^[4] uvádí obdobné kritérium pro stanovení injektovatelnosti cementových injektážních směsí. Toto kritérium je stanoveno poměrem D_{15}/d_{95} . Pokud je hodnota tohoto poměru větší než 24, je zemina injektovatelná, při poměru menším než 19 nevhodně injektovatelná a když je hodnota poměru menší než 11, je injektáž nemožná. Výsledný poměr mezi 19 a 24 znamená, že injektování bude obtížné.

Z výše uvedených kritérií a z průměru zrna injektážní suspenze na hranici d_{85} , resp. d_{95} , můžeme v prvním přiblížení stanovit minimální možný průměr zrna D_{15} zeminy, určené k injektování. Podle Verflova kritéria injektovatelnosti pro materiál D460 vychází hraniční minimální průměr zrna D_{15} injektované zeminy cca 0,2 mm, podle Henna je to cca 0,3 mm. Pro druhý z analyzovaných materiálů S2 vycházejí dle výše uvedených kritérií minimální průměry zrna cca 1,0 mm resp. cca 1,7 mm. Úvahy o injektovatelnosti na základě analýzy

těchto kritérií je třeba používat opatrně a slouží k první orientaci. Je vhodné si je ověřit injekční zkouškou in situ popř. v laboratoři. Na celkový stav injektovatelnosti budou mít vliv i další vlastnosti (stavy) zemin, např. zda jde o zeminu stejnozrnnou či nestejnozrnnou.

Pro injektáže hornin skalního typu je injektážní kritérium např. dle Henna [4] modifikováno následovně. Kritérium je vyjádřeno poměrem šířky trhliny k průměru zrna d_{95} uvažovaného injektážního materiálu. Pokud je poměr šířky trhliny k průměru zrna d_{95} injektážní suspenze větší než 5, je injektáž teoreticky možná, v případě, že je poměr menší než 2, je injektáž nemožná. Podle tohoto kritéria injektovatelnosti pro materiál D 460 vychází minimální šířka injektované trhliny cca 0,1 mm, pro materiál S2 je minimální šířka trhliny cca 0,4 mm.

Laboratorní výzkum vlastností geokompozitů

Laboratorní práce proběhly v laboratořích Ústavu geoniky Ostrava, kde byla předem připravena horninová zkušební tělesa (vrtná jádra o průměru 48 mm, resp. 36 mm) z godulského pískovce pro přípravu vlastních zkušebních těles geokompozitů. Testování mechanických vlastností geokompozitů, vytvořených na bázi testovaných materiálů a hornin skalního typu bylo prováděno na zkušebních válcových horninových tělesech se zainjektovanou diskontinuitou, na kterých byly provedeny dva typy zkoušek.

První způsob testování byl prováděn na horninových vrtných jádrech se zalepenou diskontinuitou, orientovanou kolmo na podélnou osu vrtného jádra. Takto připravené zkušební těleso geokompozitu bylo podrobeno zkoušce v prostém tahu. Směr tahového namáhání byl kolmý na slepenou diskontinuitu. Diskontinuita v horninových jádrech byla připravena řezáním nebo lomem, což představuje dva odlišné typy povrchů, dále byly diskontinuity lepeny v suchém nebo mokřem stavu (jádro bylo namočené před slepením ve vodě cca 72 hodin). Celkem bylo připraveno cca 50 zkušebních těles, u každé varianty (např. mokřá diskontinuita vzniklá řezem, suchá diskontinuita vzniklá lomem apod.) cca 6 zkušebních těles. Výsledky jednotlivých zkoušek pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v následující tabulce (pozn. doba zkoušení od přípravy geokompozitů 10 dnů).

Tabulka č. 1 Průměrné výsledné hodnoty pevnosti v tahu geokompozitů s diskontinuitou slepenou testovanými materiály a použité horniny (MPa)

Godulský pískovec	D460				S2			
	Suchá disk. lom	Suchá disk. řez	Mokřá disk. lom	Mokřá disk. řez	Suchá disk. lom	Suchá disk. řez	Mokřá disk. lom	Mokřá disk. řez
5,4	1,3	1,0	--*	--*	1,6	1,3	0,3	0,2

*..... geokompozity se rozpadaly při manipulaci se zkušebními tělesy

Pro druhý typ zkoušky byla připravena válcová zkušební tělesa geokompozitů vytvořená z vrtných jader o průměru 48 mm se štíhlostním poměrem 2 (výška : šířka), které byly rozděleny šikmým řezem pod úhlem cca 30° k podélné ose vzorku tak, aby diagonální řez neprotínal podstavu válcového zkušebního tělesa. Obě části byly následně slepeny testovanými materiály. Takto připravená zkušební tělesa byla podrobena tlakovému namáhání jako u zkoušky pevnosti v jednoosém tlaku. Tento typ zkoušky je označován jako „Bond strength test“ (dle ASTM) nebo také „Arizona slant shear test“, používaný ke zhodnocení a porovnávání schopnosti materiálu pojiva přilnout k povrchům trhlín. Jedním z možných vyhodnocení tohoto testu je vyjádření podílu pevnosti v jednoosém tlaku slepeného geokompozitu a původního horninového materiálu vyjádřeného v procentech. U každé směsi

bylo testováno 6 zkušebních těles geokompozitů. Výsledky jednotlivých zkoušek pro jednotlivé směsi jsou uvedeny v následující tabulce (pozn. doba zkoušení od přípravy geokompozitů 15 dnů).

Tabulka č. 2 Průměrné výsledné hodnoty zkoušky „Bond strength test“ a jednoosé pevnosti v tlaku použité horniny

Godulský pískovec	D460	S2
Pevnost v jednoosém tlaku (MPa)	Podíl pevností v jednoosém tlaku geokomp. a horniny (%)	Podíl pevností v jednoosém tlaku geokomp. a horniny (%)
120	7	13

Disperze pojivové báze byla připravena především ve dvou experimentech pro dva různé výchozí typy jílových odpadů D460 a S2. V obou případech jako dvousložková směs v množství 200 g předem připraveného prášku a 236 g předem připraveného vodného roztoku aktivující složky. Tyto směsi vytvářející polymerní pojivo byly míchány v kuchyňském robotu po dobu 45 minut a poté byly nanášeny na plochy diskontinuit v horninových vzorcích a následně slepeny a zafixovány. Spoje (diskontinuity) byly následně zalepeny plastovou páskou, aby se zamezilo rychlému odsychání vody z povrchu a u mokrých vzorků bylo třeba zabránit vytékání směsi. U mokrých vzorků bylo dále zjištěno, že voda na povrchu řezů zásadním způsobem ředí přesně připravenou směs vznikajícího polymeru. Suché vzorky naopak velmi rychle roztok ze směsi odsají.

V poslední části laboratorního výzkumu byly připraveny ze zbytků obou připravených směsí geokompozity na bázi středně zrného písku o vlhkosti cca 10%. Objem testovaných směsí (pojiv) ve vzorku geokompozitu se pohyboval okolo 40%. Rozmíchaný písek s pojivem byl vpraven do válcových forem o průměru 46 mm a výšce 100 mm. Po vytvrzení byla u každé směsi z těchto polotovarů připravena 3 zkušební tělesa se štíhlostním poměrem 2 (výška:šířce) a podrobena zkoušce v jednoosém tlaku. Na dvou zkušebních tělesech se štíhlostním poměrem cca 1 u obou testovaných směsí byl zjišťován koeficient filtrace v propustoměru s tlakovou komorou za stálého hydraulického spádu. Dalším, pouze orientačním, pokusem bylo stmelení kostek z černého uhlí pro zjištění vytvoření pevného spoje. Výsledky jednotlivých zkoušek pro jednotlivé směsi jsou uvedeny v následující tabulce (pozn. doba zkoušení od přípravy geokompozitů 10 dnů).

Tab. č. 3 Průměrné výsledky zkoušky geokompozitů v jednoosém tlaku a zkoušky propustnosti

	D460	S2
Pevnost v jednoosém tlaku (MPa)	32	5
Modul přetvárnosti (MPa)	6700	1200
Koeficient filtrace (m.s⁻¹)	4,3 – 5,3 . 10 ⁻¹¹	7,5 – 8,9 . 10 ⁻¹⁰

Závěr – zhodnocení výsledků

Z výsledků provedených zkoušek je zřejmé, že testovanými předmětnými anorganickými polymerními materiály na bázi odpadových alumium-silikátů můžeme dosáhnout určité míry zpevnění a změnu mechanických vlastností horninového masivu, i když ne v takové míře, jak je tomu například u polyuretanových, popř. organicko-minerálních pryskyřic. Ze srovnání výsledných hodnot výše uvedených tahových pevností geokompozitů se slepenou diskontinuitou a geokompozitů s polyuretanovými pryskyřicemi za srovnatelných podmínek (stav a kvalita diskontinuity) můžeme konstatovat, že u geokompozitů s anorganickými polymery tyto pevnosti dosahují cca 30 - 50% tahové pevnosti geokompozitů s polyuretany. Můžeme konstatovat, že na kvalitu zpevnění u hornin skalního typu bude mít vliv jak drsnost diskontinuity, tak přítomnost vody nebo zvýšená vlhkost jejich stěn (viz tab. č. 1). U geokompozitů se slepenou diskontinuitou bylo dosaženo lepších výsledků (oba typy testů) u zkušebních těles s materiálem S2. U hmoty aditivované křemenným pískem byl trend zcela opačný, který lze vysvětlit jak množstvím tohoto aditiva k základní pojivové směsi (60:40) a dále jeho granulometrií. V souhrnu lze říci, že určité množství plniva zvýší pevnosti hmot přičemž, podobně jako u jiných pojiv, záleží na proporcionálním rozložení velikosti zrn aditiva. V případě velkého množství plniva pak zcela zákonitě pevnosti klesají. Měření propustnosti ukázala, že vznikají materiály s velmi nízkým koeficientem filtrace srovnatelné s velmi nepropustnými zeminami, jako jsou např. jílové zeminy. Bylo ověřeno, že testované anorganické polymerní materiály mohou vytvořit pevné spojení s uhelnou hmotou. Z důvodů rozměrů polotovaru a rozpadavosti použitého uhlí nebylo možno určit pevnostní parametry tohoto spojení.

Z výsledků tohoto vstupního laboratorního výzkumu a dosavadních znalostí o těchto anorganických polymerních materiálech můžeme v prvním přiblížení konstatovat, že použití těchto materiálů v injektážním procesu má svá omezení. Reakce vytvrzování probíhá při teplotách nad cca 20°C, proto není možno v běžných podmínkách např. injektovat nesoudržné zeminy. U hornin skalního typu bude použití rovněž omezeno na horninový masiv s vyšší teplotou, např. karbonský horninový masiv. Další omezení spatřujeme v použití těchto materiálů v mokřím prostředí a v prostředí s proudící podzemní vodou a to z důvodu delších vytvrzovacích časů cca 12 – 24 hod, což může být příčinou rozplavování, popř. ředění těchto materiálů při injektáži.

Výhodou těchto materiálů bude pravděpodobně jejich nízká cena především proto, že se jedná o využívání stávajících jílových odpadových surovin, které nejsou jinde v průmyslu používány. Při srovnání s cementem vyniká především nižší energetická náročnost přípravy. Pro upřesnění a zpřesnění použití těchto materiálů v injektážních technologiích by měly být řešeny další otázky, například: změna pevnostních parametrů geokompozitů v závislosti na čase, proinjektovatelnost trhlin v závislosti na jejich rozevření, upřesnění a způsob přípravy směsi a technologického vybavení pro injektování, upřesnění a stanovení nejnižší možné teploty horninového masivu pro efektivní vytvrzení, vliv teploty horninového masivu na výsledné pevnostní parametry apod.

Je zřejmé, že tyto materiály najdou uplatnění v budoucnosti např. ve stavebnictví, v oblasti restaurování stavebních památek apod. Na závěr uvádíme pro zajímavost jiné způsoby využití těchto anorganických polymerních materiálů. Základní směsi vytvářející anorganické polymery lze plnit dalšími materiály (písky z plavení kaolinu, odpadovou slídou, drceným stavebním odpadem, vápencem apod.) a to až do množství 85% k množství jílové složky. Podle množství plniva a jeho granulometrického složení lze regulovat jak pórovitost vznikajících látek, tak jejich pevnost v tlaku a tím zásadně ovlivňovat fyzikální vlastnosti.

Vzhledem k možnosti měnit plynule vlastnosti vznikajících materiálů aditivní složkou je značně široká i možnost využití anorganických polymerních směsí v mnoha dalších oblastech použití. Pevnosti v jednoosém tlaku, současně významná odolnost proti vysokým teplotám a minimální teplotní dilatace dávají předpoklad užití těchto materiálů v alternativních

stavebních aplikacích. Další aplikace lze předpokládat u materiálů, které budou tvořeny jako kompozit, kdy jedna strana může být vysoce napěněna, tedy tvoří vynikající tepelný i zvukový izolant, a druhá strana by tvořila nosnou konstrukci. Obě složky jsou tvořeny podobným způsobem a jsou vzájemně propojeny, tedy neobsahují žádný cizorodý tmel. Podobně byly kompozitní materiály získány při aplikaci pojivové báze na skleněné a čedičové vlákno nebo ve spojení anorganických polymerníchází s vlákny žáruvzdornými.

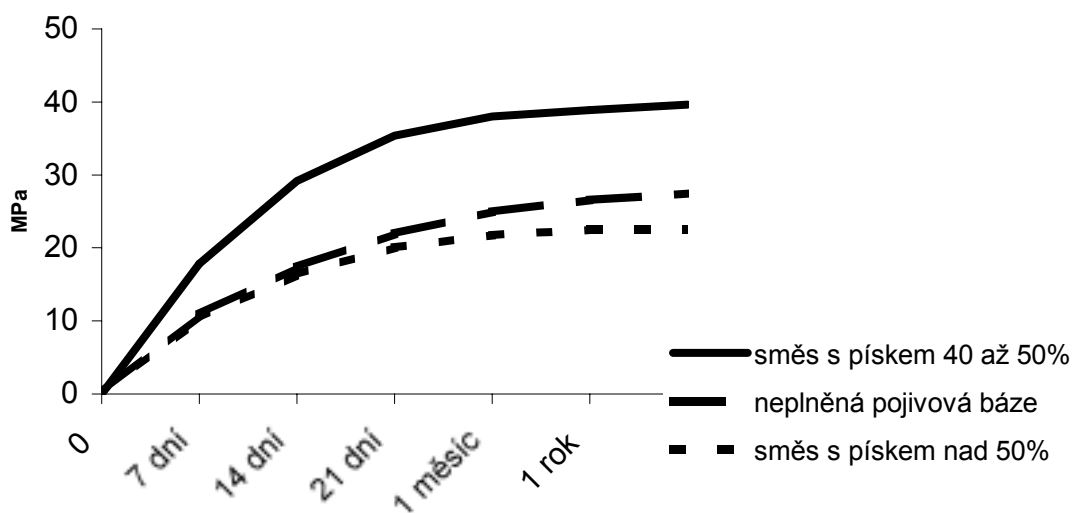
Například u pevných látek získávaných ze směsí elektrárenských popílků je pojivo tvořeno z odpadových silikátových materiálů z těžby a zpracování keramických surovin, vytváří polymerní anorganickou prostorovou síť, která pevně obklopuje částice popela. Je předpoklad, že jednoduchá skla popeloviny částečně vstupují do hydrolytických reakcí a vytvářejí tak velmi pevné a chemicky odolné hmoty. Jsou-li takové hmoty dále aditivovány křemenným pískem, pak se hodnoty naměřené v jednoosém tlaku (z provedených experimentů na ÚSMH) pohybují v rozmezí 30 – 35 MPa. V případě tohoto experimentu byl váhový poměr popílků k aktivující složce 3 :1 s tím, že ani tato složka není primárním materiálem současného průmyslu, ale jílovým odpadem. Tento odpad má pouze 48 – 52% vlastní jílové složky a zbytek je velmi jemný křemičitý písek s velikostí zrna do 100 μm . Aktivovaný materiál byl míchán s popílkem tak, aby bylo dosaženo odpovídající chemické reakce, při které dochází k polymeraci. Tato viskózní směs byla dále plněna 30, 40 a 50% běžného písku za vzniku thixotropních směsí, které byly lity a vibrovány do forem.

Bylo zjištěno, že :

- 1) vzniká pevný a kompaktní materiál z celého objemu směsi,
- 2) k tuhnutí dochází i pod vodou nebo bez přístupu vzduchu,
- 3) vzniklý materiál nemá prakticky žádné smrštění, maximální hodnoty jsou do 1% objemu,
- 4) vzniklý materiál dokonale vyplňuje formu a kopíruje všechny její detaily,
- 5) vzniklý materiál je nehořlavý a neuvolňuje v žáru žádné zplodiny,
- 6) při teplotách do 500 °C nedochází k destrukci materiálu ani po prudkém ochlazení

Použitím vhodného plniva lze připravit materiály, které odolávají teplotám převyšujícím 800°C. Ani při překročení této teploty však nedochází k destrukci materiálu a takové materiály snesou i přímé ochlazení studenou vodou. Výsledky měření pevností a další testy byly získány po vytvrzení směsí, po 12 – 16 hodinách při teplotách 20 - 25°C a po dalším vyztváření po 14 a 21 dnech (viz graf pevností v závislosti na čase – obr. č. 3). Zde je třeba upozornit na skutečnost, že se jedná o reakce ve vodném prostředí a převážná většina vody musí z výrobku postupně a pomalu odejít. Předpokladem je, že polymerní reakce probíhá i ve chvíli, kdy již vznikla pevná látka. Ta však stále obsahuje značné množství vody, která plynule a postupně odchází.

Časový nárůst pevnosti v tlaku hmot z elektrárenských popílků



Příspěvek byl zpracován s podporou projektu AV ČR č. S3086351 a S 3046004 v rámci Programu podpory cíleného výzkumu a vývoje.

Literatura:

1. Iler R.K.: *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica*, Vol.I,II. Izd. Mir, Moscow, 1982 (in Russian).
2. Sanz J., Madani A., Serratosa J.M.: *Commun. Am. Ceram. Soc.* 71,418 (1988)
3. Hanzlíček T., Steinerová M.: *Ceramics-silikáty* 46(3) 81-120 (2002) pp 97 - 103
4. R. W. Henn: *Practical Guide to Grouting of Underground Structures*, ASCE Press – Thomas Telford Publications, New York – London, 1996
5. J. Verfel: *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1983