

fevdbc

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Studium žárové odolnosti protipožárních zábran pomocí
kompozitů na bázi geopolymérů**

**Study of fire resistance barriers using composites based
geopolymer**

Bc. Le Chi Hiep

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Konzultant: Ing. Vladimír Kovačič

Rozsah práce:

Počet stran textu: 77

Počet obrázků: 58

Počet tabulek: 6

Počet grafů: 8

Počet příloh: 2

Datum: 25.5.2015

ANOTACE:

Tato diplomová práce se zabývá studiem žárové odolnosti protipožárních zábran pomocí kompozitů na bázi geopolymérů. V teoretické části byly popsány pojmy, které se toho tématu týkají. Jsou zde provedeny a vysvětleny pojmy geopolymér a kompozitní geopolymér. Byla provedena rešerše na téma protipožárních zábran a žárové odolnosti kompozitů na bázi geopolymérů a protipožární ochrany desek OSB. V praktické části je ověřována požární odolnost dřevoštěpkové desky - OSB, na kterou byla nanášena vrstva malty. Byly provedeny zkoušky prohoření dřevných desek opatřených nánosem geopolymerní malty pomocí plamene z plynového hořáku. Jako topné médium byl použit propan-butan. Byl měřen čas, potřebný k prohoření desky, popř. čas do prvních projevů změn desky na neexponované straně (od plamene). Geopolymerní malta byla namíchána v 6 recepturách. Na základě rozboru všech dosažených výsledků lze říci, že geopolymerní malta příznivě ovlivňuje ohnivzdornost OSB desek. Kromě zkoušek prohoření byly provedeny také zkoušky fyzikálně mechanických vlastností jednotlivých receptur a vyhodnoceny. Bylo provedeno jejich porovnání mezi sebou.

ABSTRACT:

This master's thesis studies fire resistance barriers using composites based geopolymér. In the theoretical part of the research was performed knowledge of notion geopolymér, geopolymér composites, research on the topic of fire resistance barriers using composites based geopolymér a chipboard - OSB. In the practical part were tested fire resistance of wood chipboard - OSB, to which was applied a thin layer of geomortar. Tests were performed to burn through the wooden plates coated of geopolymér mortar using the flame of a gas torch. As heating medium was used propane. It was measured the time required to burn through the plate, or time until the first signs of change on the reverse-side of the plate. Geopolymér mortar was mixed in 6 recipes. Based on a comprehensive analysis of the results obtained, we can said that geopolymér motar had a positive effect to fire resistance, while the physico-mechanical properties formulas were calculated and evaluated with each other.

Klíčová slova: hořlavost, OSB deska, geopolymér, geopolymerní malta.

Keywords: OSB board, geopolymér, geopolymér motar, flammability

Poděkování:

Srdečně děkuji Prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. za veškerou jeho ochotu, podporu při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimíru Kovačičovi. Poděkování patří i všem členům strojní fakulty, kteří mi byli, během mého studia, vždy ochotni poskytnout radu.

Mé poděkování patří také mé rodině, která mne podporovala a věřila mi.

Seznam použitých symbolů a zkratek

H₂O	<i>ang. Water</i>	Voda
Al₂O₃	<i>ang. Aluminium trioxide</i>	Oxid hlinitý (korund)
KOH	<i>ang. Potassium hydroxide</i>	Hydroxid draselnatý
NaOH	<i>ang. Sodium hydroxide</i>	Hydroxid sodný
SiO₂	<i>ang. Silicon dioxide</i>	Oxid křemičitý
Fe₂O₃	<i>ang. Iron trioxide</i>	Oxid železitý
CaO	<i>ang. Calcium oxide</i>	Oxid vápenatý
MgO	<i>ang. Magnesium oxide</i>	Oxid hořečnatý
Na₂O	<i>ang. Sodium oxide</i>	Oxid sodný
TiO₂	<i>ang. Titanium dioxide</i>	Oxid titaničitý
K₂O	<i>ang. Potassium oxide</i>	Oxid draselný
B₂O₃	<i>ang. Boron trioxide</i>	Oxid boritý
F	<i>ang. Fluorine</i>	Fluór
PS	<i>ang. Polysialate</i>	Polysialát
PSS	<i>ang. Poly (sialate-siloxo)</i>	Poly (siloxo-sialát)
PyC	<i>Pyrolitic carbon</i>	Pyrolyzovaný uhlík
LAS	<i>lithium alumino silicate glass</i>	lithiná sklo-keramika
CAS	<i>calcium aluminosilicate glass</i>	vápenatá sklo-keramika
SEM (REM)	<i>ang. Scanning electron microscopy</i>	Rastrovací elektronová 18mikroskopie
T [°C]	<i>ang. Celsius temperature</i>	Teplota Celsia
ρ [g/cm³]	<i>ang. Density</i>	Hustota
m [g]	<i>ang. Weight</i>	Hmotnost
l [mm]	<i>ang. Lenght</i>	Délka (vzorku)
D[mm]	<i>ang. diameter</i>	Průměr(vzorku)
σ(σ_{max}) [MPa]	<i>ang. Stress compressive (maximum)</i>	Napětí v tlaku (maximální = mez pevnosti v tlaku)
F [N]	<i>ang. Loading force compressive</i>	Zatěžující síla v tlaku
E[MPa]	<i>ang. Modulus of elasticity</i>	Modul pružnosti v tlaku

Obsah

1. Úvod	10
2. Cíl práce	10
3. Geopolymer	11
3.1. Pojem geopolymer	11
3.1.1. Struktura geopolyméru	11
3.1.2. Vytvrzování geopolyméru, geopolymérace	13
3.1.3. Vlastnosti geopolymérů	15
3.1.4. Aplikační možnosti geopolymérů	16
3.2. Kompozity s geopolymerní matricí	16
3.3. Žárové odolnosti geokompozitu	17
3.4. OSB deska	27
4. Experimentální část	28
4.1. Metodika práce	28
4.1.1. Příprava geopolymerní směsi	31
4.2. Charakteristika použitých surovin	36
4.2.1. Cement Baucis L160 a Pojivo L160	36
4.2.2. Elektrařenský popílek – popílek K6	37
4.2.3. Technický granát HS	38
4.2.4. Mleté odpady z keramiky	38
4.2.5. Odpadové sklo	39
4.2.6. Krátké čedičová vlákna	39
4.2.7. Tkaniny čedičové	40
4.3. Tlaková zkouška geokompozitu	40
4.4. Zkouška prohoření OSB desky	41
4.5. Zkouška adhezni pevností	42
4.6. Pozorování mikrostruktury vzorků	42
5. Výsledky a vyhodnocení	43
5.1. Adhezni pevností	43
5.2. Objemové hmotnost	45
5.3. Nasákavost	46
5.4. Pevnost v tlaku	48
5.5. Struktura vzorek na Semku	50
5.6. Výsledky po požární odolnosti na desek OSB	57
6. Závěr	64
7. Seznam obrázků, tabulek, grafů a rovnice	66
8. Použitá literatura	69
9. Příloha	70
9.1. Měřené hodnoty z zkoušky v tlaku	70
9.2. Přehled vzorků při laboratorní teplotě po 28 dnech a po tepelném zatížení	72

1. Úvod

V oblasti stavebních konstrukcí se klade velký důraz na bezpečnost, zejména z hlediska požární bezpečnosti, tedy schopnosti maximálně omezit riziko vzniku a šíření požáru. Čím je schopnost požární odolnosti vyšší, tím je vyšší pravděpodobnost, že se zabrání nejen ztrátám na životech a na zdraví osob, ale také ztrátám na majetku. Úkolem materiálového inženýrství je najít odolnější materiály. Tyto materiály musí odpovídat kritériím ekonomickým i ekologickým.

Geopolymery jsou alkalicky aktivovaným hliníkokřemičitanovým materiálem s mnoha výjimečnými vlastnostmi jako je jejich vynikající požární odolnost, nízká hustota, nízká cena vzhledem k jejich výkonu, snadná zpracovatelnost, šetrnost k životnímu prostředí a výborné tepelné vlastnosti. Další výhodou geopolymérů je, že v nich lze využít průmyslových odpadních materiálů. Obecně lze říci, že jakékoli minerální jíly s vysokým obsahem oxidu křemičitého a oxidu hlinitého mohou být aktivovány v alkalickém prostředí za exotermické reakce, čímž dojde k polykondenzačnímu procesu geopolymeryzace [4].

Výzkumem bylo prokázáno, že kompozitní materiály na bázi geopolymerní matrice mají nejen vynikající mechanické vlastnosti, jsou lehká a velmi pevná, ale mají také ideální protipožární odolnost (mohou odolat teplotě až nad 1000°C při dlouhodobém užívání). Tyto speciální vlastnosti v praxi umožňují využívat efektivněji geopolymerních matic kromě klasických oblastí rovněž v high-tech technologiích, jako je letectví, námořní architektura, pozemní přeprava nebo automobilový průmysl, tedy zejména pro různé aplikace, které vyžadují vysokou teplotní odolnost. [3]

2. Cíl práce

Cílem diplomové práce bylo studium chování geopolymerních kompozitů s různou anorganickou výztuží při působení vysokých teplot a ověřit schopnost zajistit ochranu dřevostaveb proti požáru. Byly vytvořeny zkušební vzorky s různým typem směsí a byly ověřeny jejich vlastnosti. Dalším cílem bylo analyzovat změny struktury po teplotním zatěžování při 850 °C. Zkušební vzorky pro analýzu žáruvzdornosti byly vytvořeny nanesením vrstvy geopolymerní malty na OSB desku a byly provedeny zkoušky prohoření. Pro zkoušky bylo použito plamene z plynového hořáku. Topným médiem byl propan-butan.

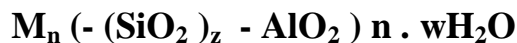
3. Geopolymer

3.1. Pojem geopolymer

Geopolymer je anorganický polymerní materiál, který je připravován z hlinitokřemičitanů. Při alkalické aktivaci přecházejí hlinitokřemičitany (alumosilikáty) za normální teploty a tlaku do dalších forem, jako je polysialát [2]. Lze říci, že jakékoli minerální jíly s vysokým obsahem oxidu křemičitého a oxidu hlinitého mohou být aktivovány v alkalickém prostředí za exotermické reakce polykondenzačního procesu geopolymerizace, při kterém se vytváří geopolymer [3]. Při geopolymerizaci vznikají kovalentní vazby Si-O-Al-O. Sialáty se skládají z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 se střídavě spojenými atomy kyslíku, dohromady pak tvoří síť. Síť musí obsahovat ionty s kladnými náboji, jako jsou Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , aby vyrovnávaly náboj iontů hliníku Al^{3+} v tetraedrické koordinaci [1].

3.1.1. Struktura geopolyméru

Základem struktury geopolymérů je třírozměrná alumosilikátová fáze, která má empirický vzorec:



Kde "M" je obecně jednomocný kation, draslík nebo sodík,

"z" je přirozené číslo značící počet jednotek SiO_2 (1, 2, 3, atd.),

"n" představuje stupeň polymerizace [4].

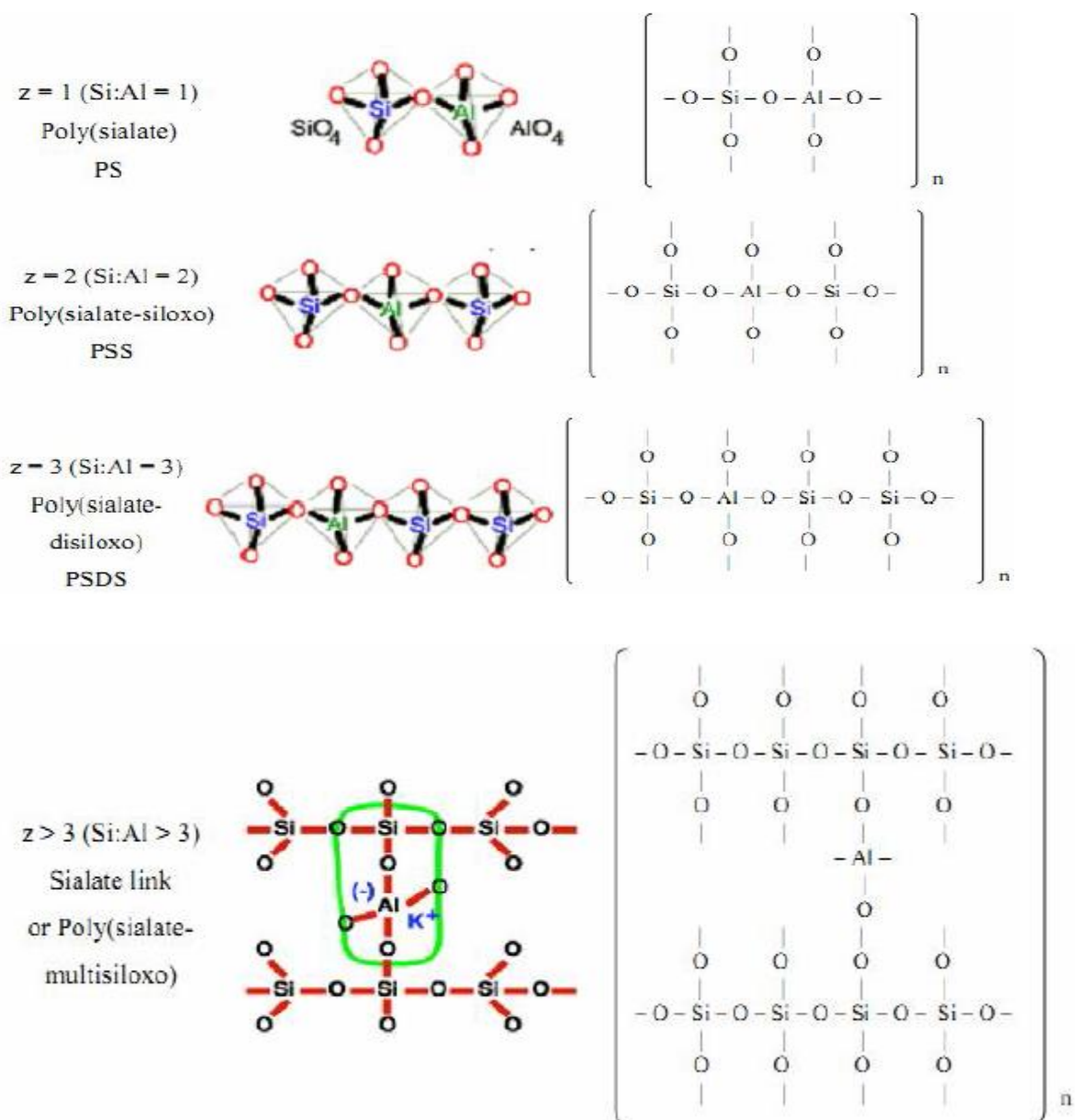
Rozlišujeme základní druhy polysialátů:

- Poly(sialát): $\text{M}_n - (-\text{Si-O-Al-O-})_n$ M-PS Si : Al = 1:1
- Poly(siloxo-sialát) $\text{M}_n - (-\text{Si-O-Al-O-Si-O-})_n$ M-PSS Si : Al = 2:1
- Poly(disiloxo-sialát) $\text{M}_n - (-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-})_n$ M-PSDS Si : Al = 3:1
- Poly(multisiloxo-sialát) $(-\text{Si-O-Al-O-})$ Si : Al >> 3:1

Polymerní struktura vyplývá z propojení poly(silikátové) struktury řetězci nebo sítí - 2D

(k výrobě betonů nízké kvality vyztužené především částicemi) nebo 3D (pevné a teplotně odolné matrice vyztužované nejen částicemi, ale i vlákny) [4].

Obrázek 1 ukazuje některé příklady polysialátových molekulárních struktur. Zahrnují alespoň čtyři základní jednotky, kde z je 1, 2, 3 a vyšší.



Obr. 1 Struktura geopolyméru sestává z polymerního Si – O – Al řetězce[4]

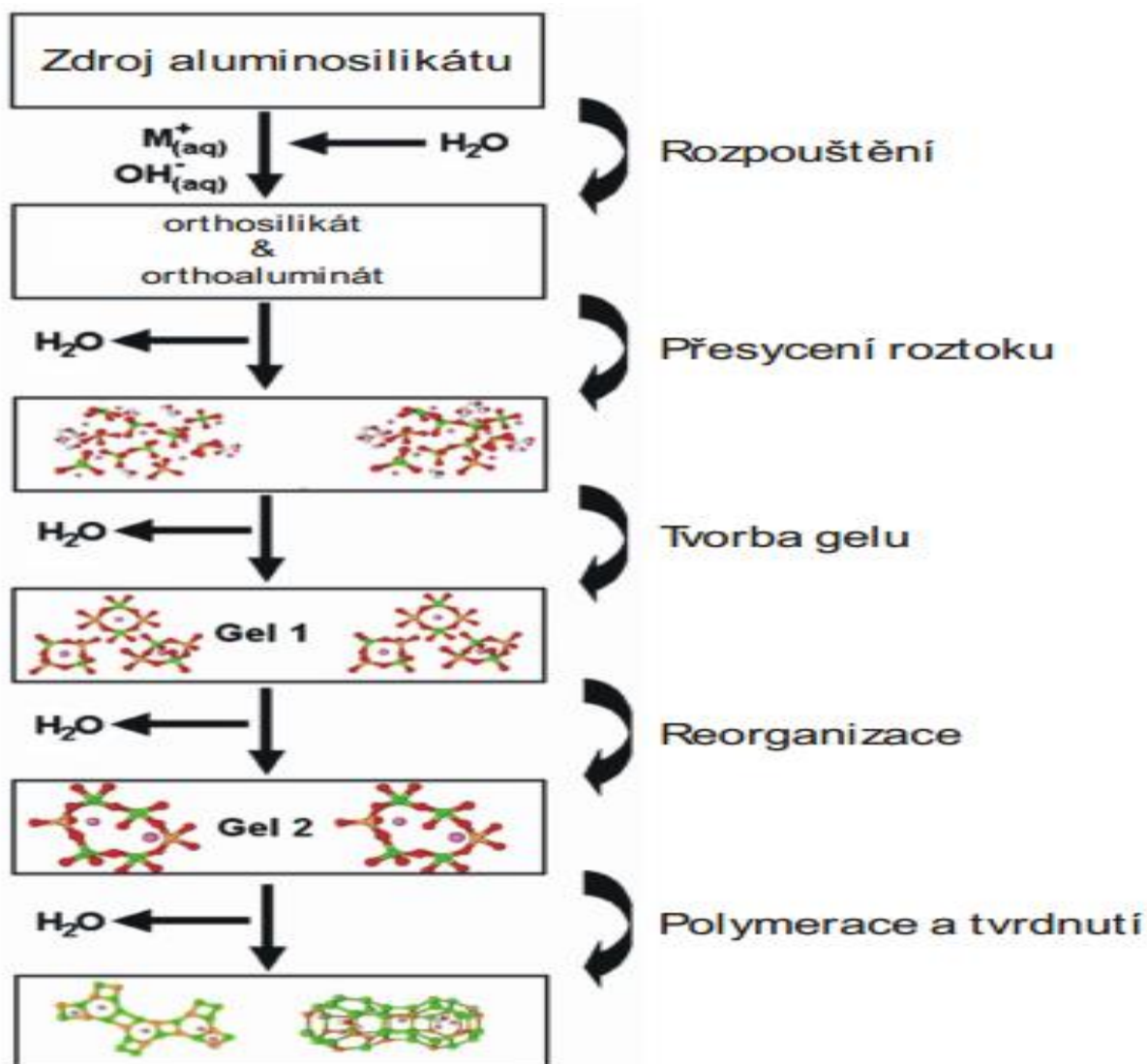
3.1.2. Vytvrzování geopolyméru, geopolymerační proces

Geopolymerní materiály podléhají procesu, který je analogický polykondenzaci, známé u polymerních materiálů. Vytvrzování nastává, pokud je aluminosilikátový materiál v kontaktu s alkalickým roztokem o vysokém pH ($\text{pH} > 12$). Jedná se o materiály vyrobené podobnými reakcemi jako plasty, ale s vlastnostmi podobnými keramickým materiálům [1, 2]. Od vynálezu geopolymérů bylo provedeno mnoho výzkumů týkajících se mechanismu jejich tvorby. Prof. Davidovits vysvětlil, že geopolymerní syntéza se skládá ze tří kroků:

- rozpuštění hlinitokřemičitanu silným alkalickým roztokem,
- přeorientování volných iontových shluků,
- jak polykondenzace, tak všechny reakce mohou být realizovány mnoha způsoby.

Většina mechanismů geopolymerační procesu se dělí na 4 hlavní fáze:

- rozpouštění aluminosilikátových surovin v zásaditém roztoku. V této fázi jsou Si a Al převedeny z pevné fáze do fáze kapalné.
- Tvorba Si, popř. Si-Al oligomerů v kapalné fázi.
- polykondenzace – tvorba zesíťované gelové struktury
- Zpevnění gelu, které znamená vazbu nerozpuštěných pevných částic a ve finále tvorba geopolymerní struktury.



Obr. 2 Zjednodušený princip geopolymrace [7]

Geopolymerace je proces exotermní a probíhá podle specifických reakcí. Tyto lze považovat za výsledek polykondenzací hypotetických monomerů orthosialátových nebo ortho(siloxosialátových). Dnes se užívá nejvíce sodný polysialát ((Na)-PS), draselný polysialát ((K)-PS), sodnodraselný poly(siloxo-sialát) ((Na, K)-PSS) a také draselný poly(siloxo sialát) ((K)-PSS) [1, 2].

3.1.3. Vlastnosti geopolymérů

Vlastnosti geopolymérů závisí zejména na vlastnostech vstupních materiálů, způsobech zpracování a doby a podmínek vytvrzování. Vytvrzené geopolymerní materiály jsou vzhledem podobné vytvrzenému portlandskému cementu. Oba materiály však mají odlišný proces vytvrzování. V případě portlandského cementu reagují v průběhu procesu tuhnutí částice cementu se zbytkovou vodou (hydratace).

Voda při vytvrzování geopolyméru slouží jako nosič alkalického aktivátoru a zůstává ve struktuře. Při odpařování přebytečné vody vzniká síť pórů a kapilár. Geopolymery získávají v prvních 3 – 4 hodinách 70% své pevnosti. Při procesu vytvrzování je dalším důležitým faktorem teplota, která může proces urychlit (vyšší teplota), nebo zpomalit, popř. zastavit (při velmi nízkých teplotách). Při teplotou urychleném vytvrzování roste tvrdost geopolyméru, avšak vzniká vyšší pórovitost.

Vlastnosti geopolymérů můžeme posuzovat ze dvou hledisek:

- a) Technické vlastnosti:
 - a. Jejich pevnost je vyšší, než u betonu
 - b. Nejsou rozpustné ve vodě
 - c. Mají výborné termoizolační vlastnosti
 - d. Podle způsobu přípravy dokáží odolat teplotám až 1000 °C
 - e. Jsou odolné vůči chemickým vlivům, zejména vůči louhům.
- b) Technologické vlastnosti
 - a. Rychlé tuhnutí
 - b. Jednoduchý a energeticky nenáročný způsob výroby
- c) Environmentální vlastnosti
 - a. Minimální produkce CO₂ při výrobě materiálu pro geopolymery
 - b. Při výrobě je možno zpracovat velké množství odpadů.
 - c. Vysoká trvanlivost
 - d. Schopnost sanace nebezpečných odpadů ve struktuře

3.1.4. Aplikační možnosti geopolymérů

Jak je patrné z výčtu vlastností, je oblast využití geopolymérů značně široká. Nacházejí své uplatnění jak ve stavebnictví, tak v kompozitních, izolačních a žáruvzdorných aplikacích.

3.2. Kompozity s geopolymerní maticí

Volně v přírodě se vyskytující (hlinito)křemičitany (např. kaolin) podléhají transformaci při nízkých teplotách ve velmi krátké době do prostorové třídimenziální struktury tzv. tektokřemičitanů.

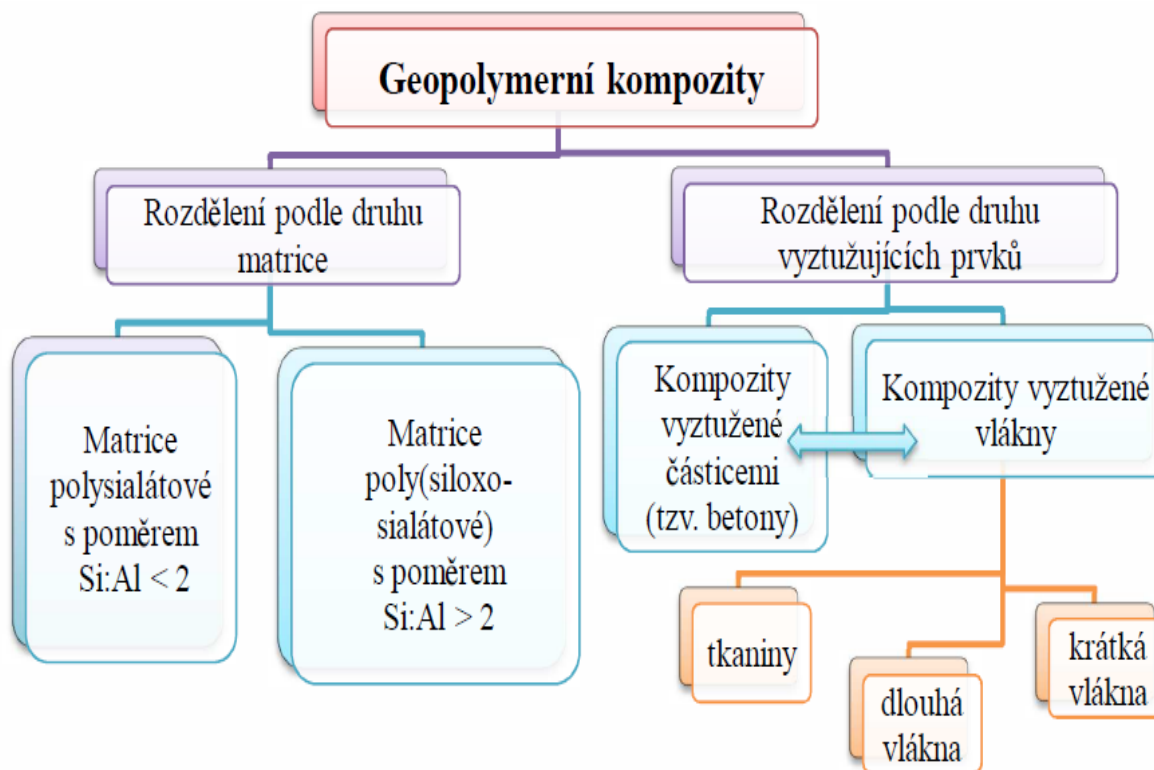
Tepelné podmínky vytvrzování těchto materiálů jsou skoro shodné s podmínkami polykondenzace organických pryskyřic. Zároveň se řadí do oblasti tzv. geochemie. Tyto materiály se nazývají "geopolymery", tedy minerální polymery vzniklé procesem, který se nazývá geochemie nebo geosyntéza.

Geosyntéza je založena na schopnosti hliníkových iontů (v koordinaci tetra nebo oktaedrické) způsobit krystalografické a chemické změny v síti křemičitanů, které umožňují jejich polymeraci.

V poslední době získaly geopolymerní materiály velkou popularitu díky relativně malé hustotě, ceně, nízké teplotě výroby a ekologickým vlastnostem. Tyto vlastnosti se nemění ani za zvýšených teplot.

Geopolymery lze použít jako matrice kompozitních materiálů. Spolu s vhodně vybranými vyztužujícími prvky dochází ke zvýšení jejich mechanických vlastností, často o několik desítek procent, aniž by došlo ke změně jejich vlastností při vyšších teplotách. Díky nízké hustotě a poměrně snadné výrobě je jejich použití možné v mnoha moderních inženýrských aplikacích. Jednotlivé složky nemění svou identitu (tzv. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ale na své okolí působí v součinnosti [6]

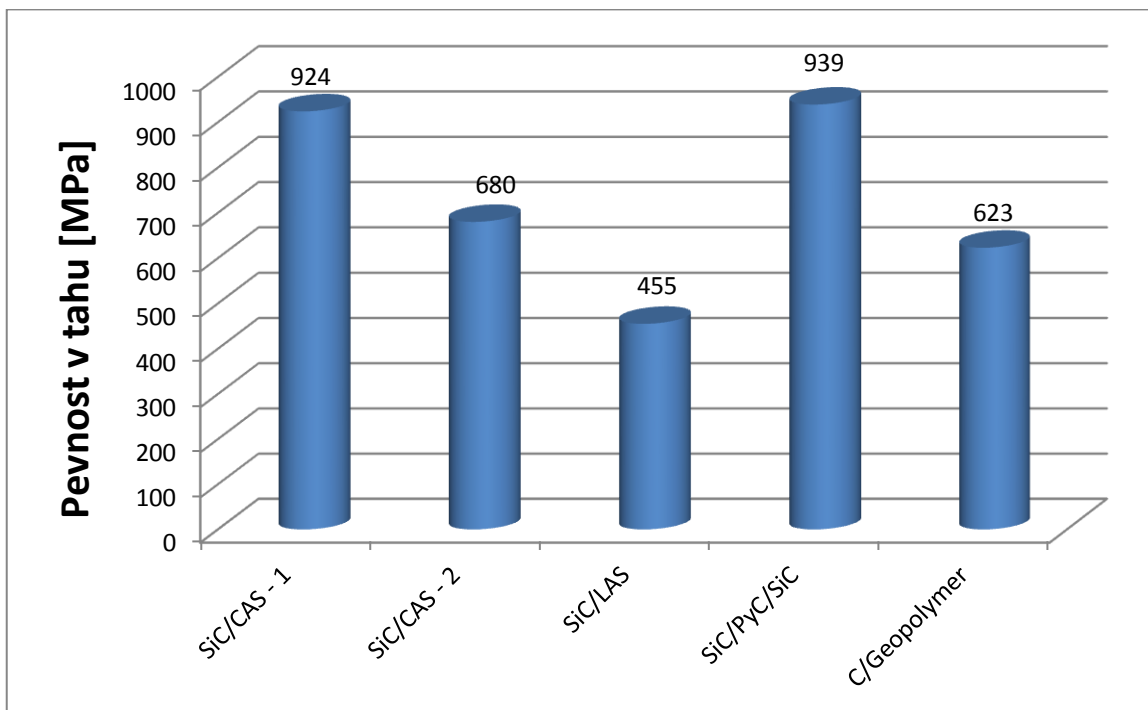
Geopolymerní kompozity lze rozdělit podle geopolymerní matrice nebo typu vyztužujících prvků – viz obr. 3



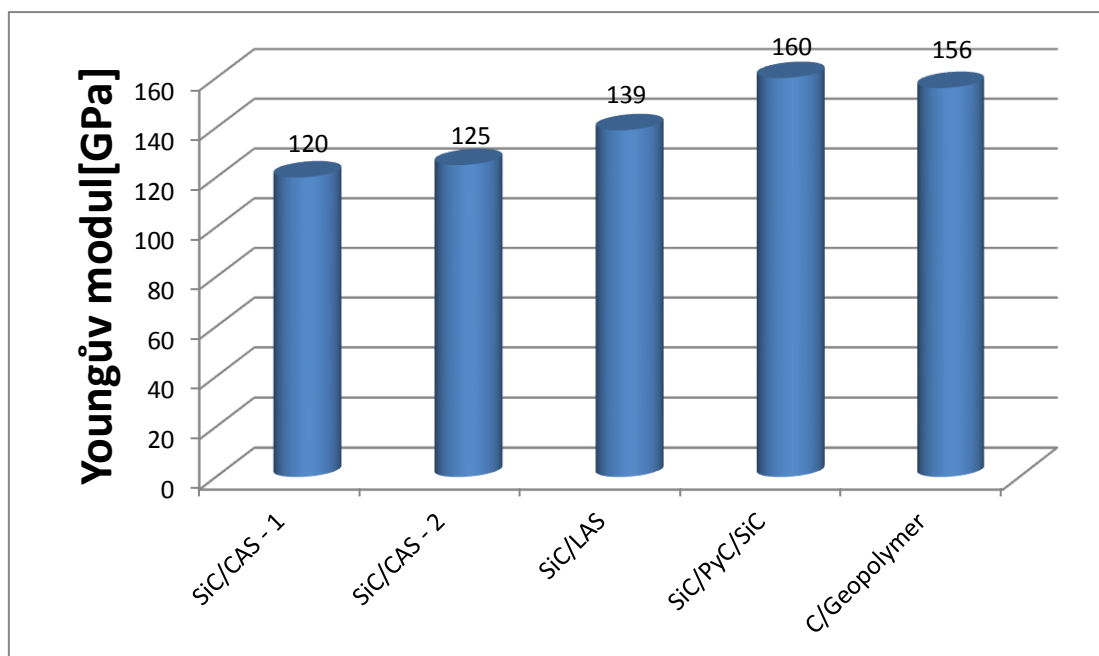
Obr. 3 Schéma přehledu geopolymerních kompozitů [8]

3.3. Žárové odolnosti geokompozitu

Nejvýznamnějším rozdílem mezi anorganickým polymerem, který je vyroben prostřednictvím geopolymeryzace včetně minerálních polymerů, které se označují jako polysialaty a organickým polymerem je míra žárové odolnosti. Kompozity na bázi organické matrice většinou nelze použít v prostředí, kde se vyžaduje vyšší teplota nad 200°C. V těchto případech aplikací jsou využívány kompozity na bázi keramické matrice (např. PyC/SiC – Pyrolytic carbon/SiC, směs pyrolitického uhlíku a SiC) nebo sklo-keramické matrice (např. CAS – calcium aluminosilicate glass, vápenatá sklo-keramika, nebo LAS – lithium alumino silicate glass, lithiná sklo-keramika) s uhlíkovým vláknem nebo keramickým vláknem jako vyztužujícím elementem. Možnosti použití těchto materiálů je silně omezeno jak z důvodu vysokých nákladů tak požadavku na speciální a vysokotepeelné zpracování [2,6]. Ve srovnání s nimi jsou kompozity založené na bázi geopolymerní matrice velmi konkurenceschopné. Geokompozity mohou vydržet teploty až nad 1000°C a nedochází při nich k uvolňování těkavých toxických látek a kouře [2,6].

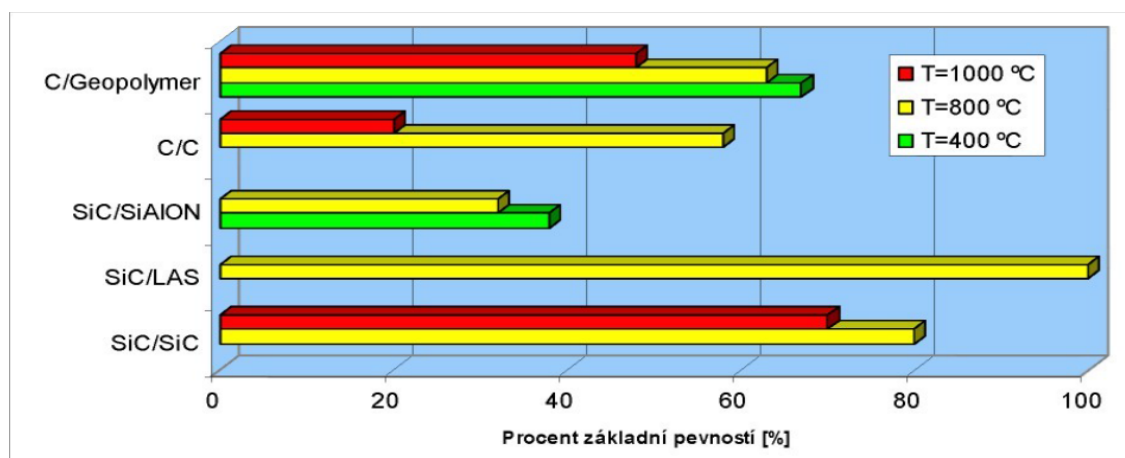


Obr. 4 Meze pevnosti v tahu vysokoteplotních kompozitů a geopolymerního kompozitu vyztuženého sekaným uhlíkovým vláknem [11]



Obr. 5 Youngův modul pružnosti vysokoteplotních kompozitů a geopolymerního kompozitu vyztuženého sekaným uhlíkovým vláknem [11]

S růstem teploty geopolymerní kompozit ztrácí část svých vlastností. Tyto poklesy však nejsou velké. Kompozity vyztužené uhlíkovým vláknem na bázi geopolymerní matrice mohou zachovat až 63% základní pevnosti v tahu při 800°C. Ve srovnání s jinými kompozity s často několikanásobně dražší výrobou se jedná o dobrý výsledek [6].

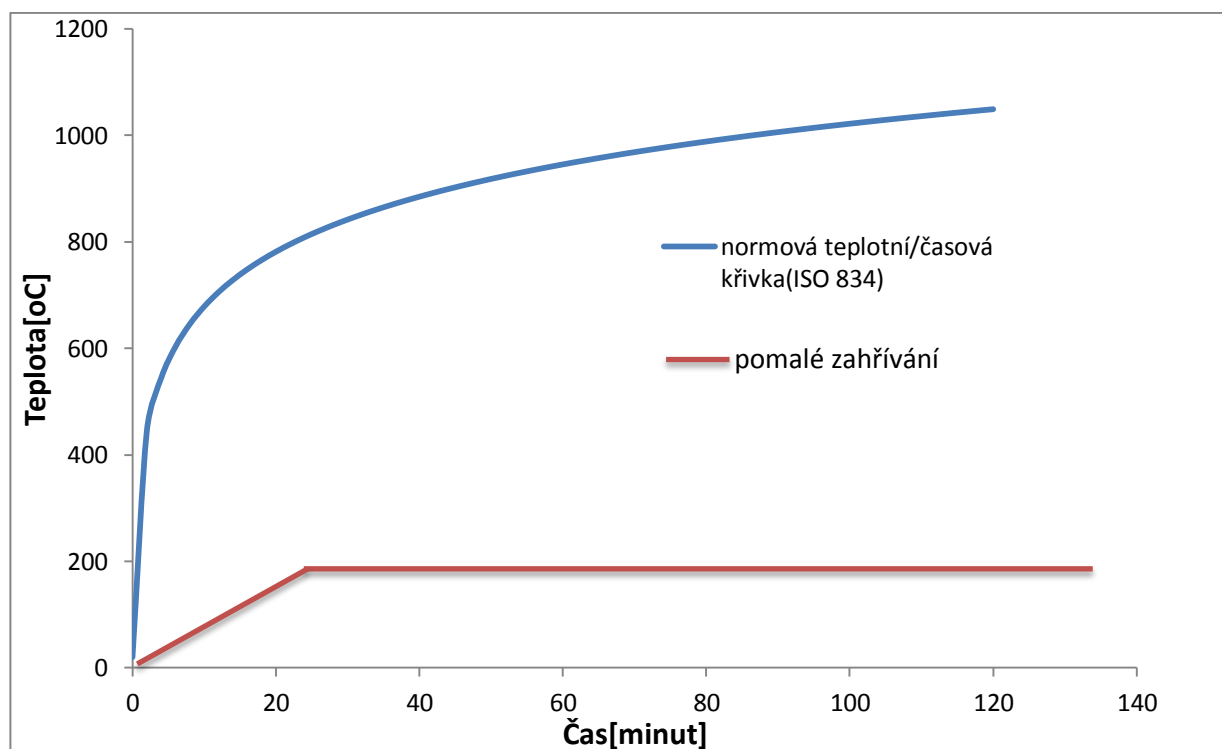


Obr. 6 Procentuální srovnání základní pevností vysokoteplotních kompozitů v závislosti na teplotě [6]

Geopolymer je také považován za potenciální materiál, z kterého jsou vyrobeny ohnivzdorné panely. Mohou hrát důležitou roli jako vrstva na povrchu kovů [12,13,14,15,16]. Ocel je jedním z nejběžnějších konstrukčních materiálů a tím jsou velmi důležité i její ohnivzdorné vlastnosti. Hodnota mezi kluzem oceli se bude snižovat o 50% při teplotě asi 550°C. Geopolymerní vrstvy mohou být navrženy tak, aby teplota byla pod 550°C. [14].

J. Temuujin et al. (Journal of Hazardous Materials 180 (2010) 748–752) zkoumal výrobu protipožární povlaků z popílku na bázi geopolyméru, kterými lze ochránit povrch kovů za účelem zajištění teploty kovů pod 550°C. Poměr mezi Al: Si a poměr mezi pevnou složkou a tekutou složkou se měnil, zatímco poměr mezi Na:Al zůstával konstantní. Geopolymerní pasty připravené z příslušných surovin pak byly uplatněny na kovové substráty ponořením substrátů do geopolymerní směsi. Po nanášení geopolymerní malty na kovových površích byly vzorky umístěny do plastového sáčku a vytvrzeny při teplotě 70°C po dobu 24 hodin. Pro měření tepelně

izolační vlastnosti povlaků autoři použili australskou normu 1530.4 “Methods for fire tests on building materials, components and structures”. Vzorky byly umístěny do příslušných oddílů ve zkušební laboratorní peci přibližně odpovídajícím standardní křivce v souřadnicích čas – teplota [14].



Obr. 7 Teplotní/časová křivka pro normy a pomalou vytápění požáru [17]

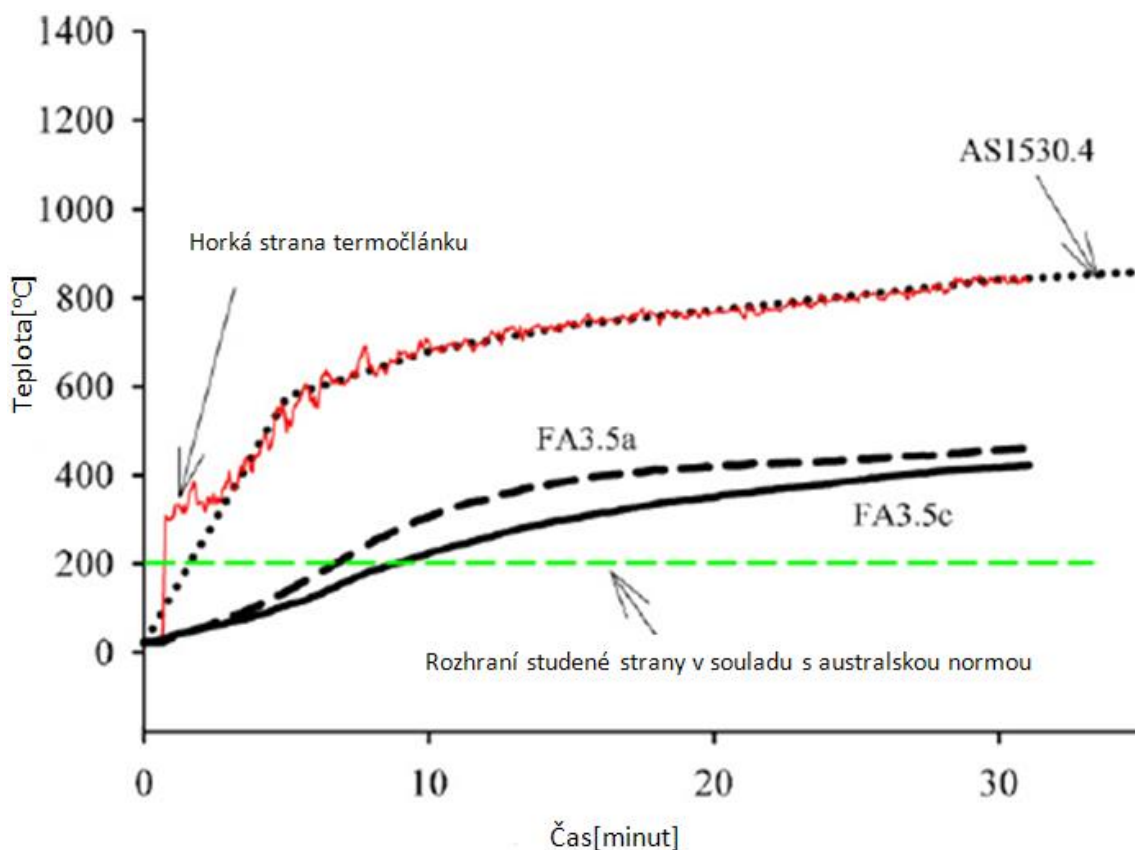
Normová teplotní/časová křivka byla vypočtena podle vztahu [14] :

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20$$

Kde: T je teplota plynů v °C a t je čas v minutách

Podle australské normy 1530.4 „Methods for fire tests on building materials, components and structures“ jsou izolační kritéria zkoušky požární odolnosti splněna tehdy, když je zajištěno, že úroveň sálavého tepelného toku je nižší, než je nutná míra, při které dochází k vznícení hořlavých materiálů a možnost z působení popálenin člověka v okolí. Pomalé ohřívání je definováno jako ohřev, kde je radiační zpětná vazba z horké vrstvy relativně nízká (zpravidla pod 200°C). Doba fáze pomalého ohřívání se může pohybovat od méně než 1 minuty do několika

hodin v závislosti na topném médiu, velikosti prostoru, atd., takže fáze pomalého ohřívání může být použita pro posouzení účinnosti požární překážek [17].



Obr. 8 protipožární zkouška vzorků dle australské normy 1530.4

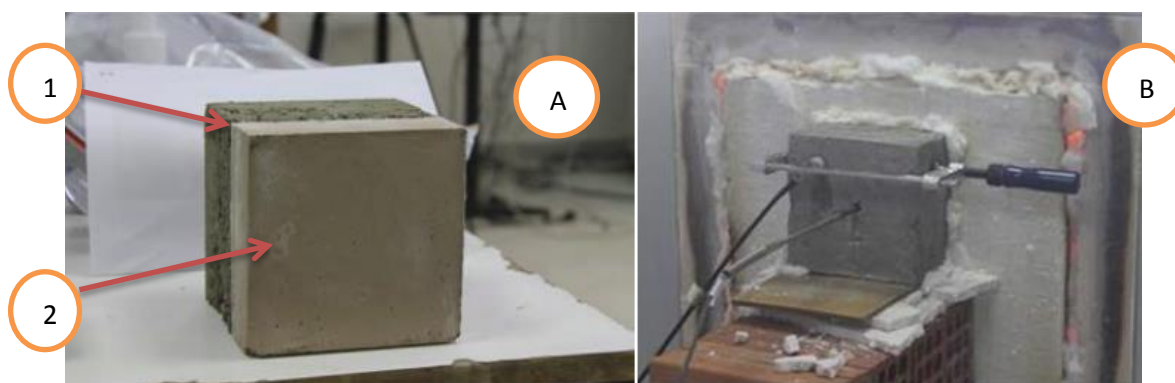
FA3.5a vyjadřuje jako poměr mezi Al:Si je 3.5 mol. a poměr mezi pevnou složkou: kapalnou složkou je 0.35 hm.

FA3.5c vyjadřuje jako poměr mezi Al:Si je 3.5 mol. a poměr mezi pevnou složkou: kapalnou složkou je 0.25 hm. [14]

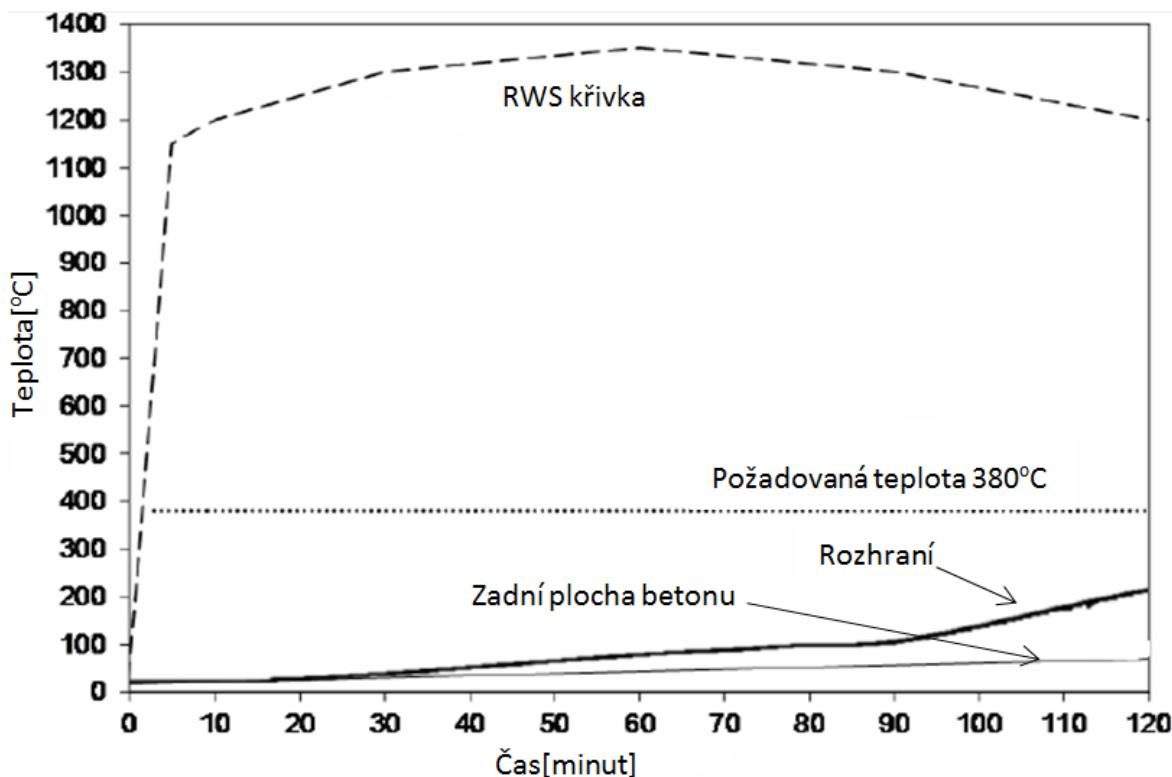
Obr. 11 znázorňuje testovací žárovou křivku vzorků FA3.5a a FA3.5c. Izolační schopnost vzorků byla vypočtena měřením nutné doby pro dosažení teploty 180°C pro neexponovanou stranu, zatímco exponovaná strana byla podrobena ohřevu podle normované teplotní křivky. Z teploty na neexponované straně vyplývá, že izolační schopnost vzorku FA3.5a byla přibližně 7 min a u

vzorku FA3.5C byla kolem 9 min. Rozdíl izolační schopnosti obou vzorků lze spatřovat v ve složení geopolyméru a tloušťce povlaku odpovídající viskozitě materiálu [14].

K. Sakkas (Sakkas, 2014) popisuje způsob požární ochrany betonu v tunelech. Požáry v tunelech jsou hlavním nebezpečím pro lidský život a mohou také způsobit velké škody na okolní infrastrukturu v důsledku výbušného odlupování betonového ostění. Výbušné odlupování nastane, když je beton vystaven ohni. Ten ztrácí část svých vlastností a dochází k snížení únosnosti. K podstatnému snížení mechanické odolnosti betonu dochází při teplotě vyšší než 300°C. Geopolymerní panel je navržen tak, aby vydržel teplotu 1350°C při požáru v tunelu a současně zajistil povrchovou teplotu betonové konstrukce pod 380°C. Laboratorní testy byly provedeny v peci, která má schopnost simulovat normovanou RWS (Rijkswaterstaat) křivku. Té je použito pro hodnocení pasivní ochrany materiálů v tunelech. Pro test byly připraveny kompozitní vzorky s rozměrem 15 x 15 x 15 cm (geopolymer na bázi metakaolimu s tloušťkou 5 cm a beton s tloušťkou 10 cm) [15].



Obr. 9 A) vzorek před testem: 1) betonový materiál ; 2) geopolymerní materiál
B) experimentální způsob při požární zkoušce [15]



Obr. 10 Protipožární odolnost geopolymerního panelu v souvislosti s křivkou RWS [15]

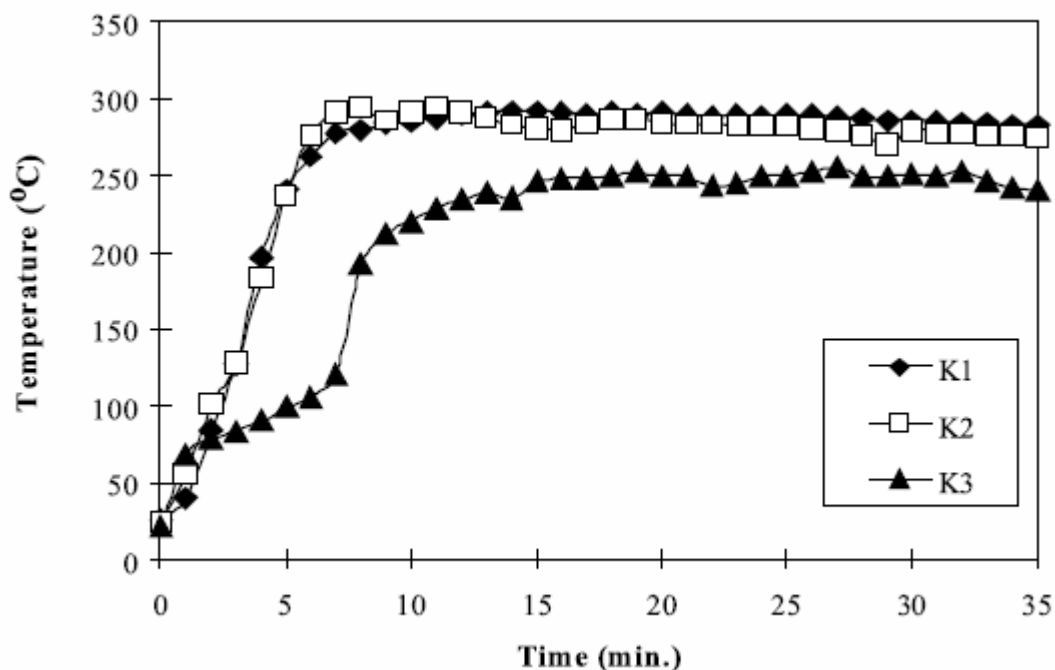
Z křivky vyplývá, že teplota na rozhraní geopolymér/beton byla nižší než 220°C po celou dobu požární zkoušky. Teplota v peci byla rychle zvýšena z laboratorní teploty na teplotu 1280°C . Náběh do teploty 1280°C byl realizován během 25 minut. Teplota rozhraní přitom ještě zůstala na 30°C a následně dosáhla 100°C , a tuto si podržela po dobu kolem 90 minut. Během této doby teplota v peci dosáhla maximální hodnoty 1350°C , teplota na rozhraní však vystoupala jen na 80°C . Na konci zkoušky byla teplota na styčné ploše geopolymér/beton jen 216°C . To znamená, že po celou dobu zkoušky byla teplota betonového panelu maximálně 216°C , kdy nedochází k poškození betonové konstrukce jak je vidět na obrázku 10 [15].



Obr. 11 vzorek po protipožární zkoušce [15]

Obrázek 11 ukazuje, že povrch geopolyméru vystavený žáru se po skončení zkoušky odlupoval ve vrstvách, avšak rozhraní geopolymér/beton je ještě bez poškození, bez ztráty své strukturální integrity [15].

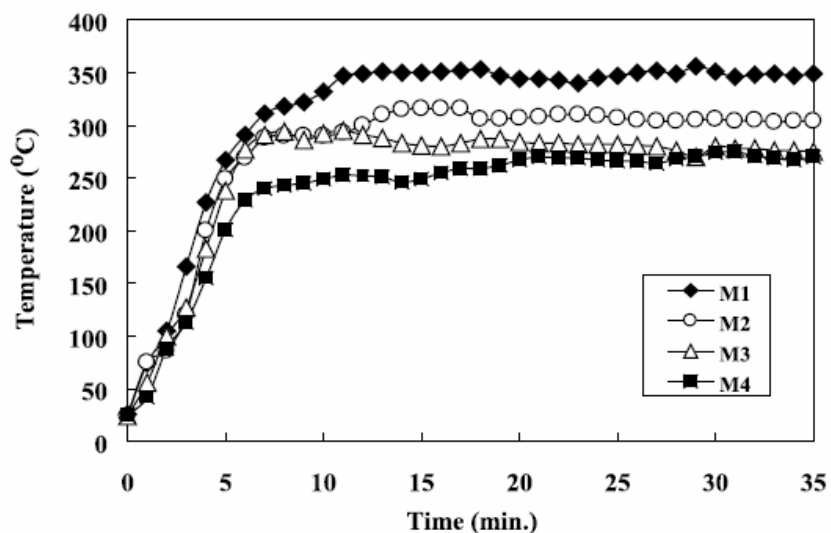
Cheng (Cheng a Chiu 2003; Cheng 2003) zkoumal výrobu protipožárního materiálu z vysokopecní strusky a minerálních odpadů. Pro protipožární test byla před plamenem umístěna geopolymerní deska s tloušťkou 10 mm a exponována teplotou 1100°C po dobu 35 minut. Výsledkem měření teploty na neexponované straně bylo, že teplota se liší od teploty na exponované straně o více než 350°C [16].



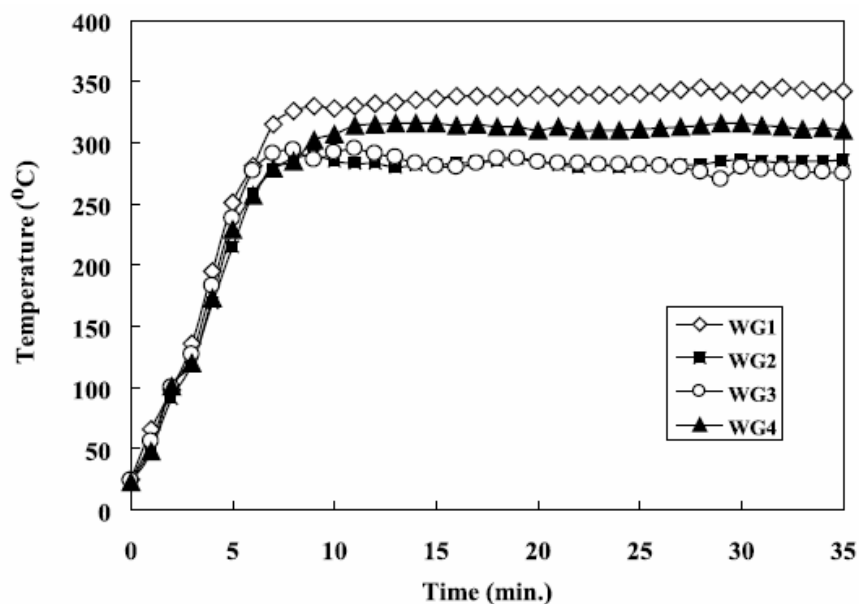
Obr. 12 Vliv koncentrace KOH na schopnost protipožární odolnosti geopolyméru.
K1= 5 M; K2= 10 M; K3= 15 M (Cheng a Chiu 2003) [16]

Obr. 12 ukazuje, že schopnost geopolyméru odolávat žárovému namáhání je závislá na koncentraci KOH. S růstem koncentrace KOH se snižuje teplota na neexponované straně. Po dobu 35 minut byla teplota vždy v intervalu 240 – 280°C. Protipožární vlastnost lze tedy zlepšit zvýšením koncentrace KOH.

Podobné protipožární zkoušky jsou uvedeny se změnou množství metakaolinu nebo křemičitanu sodného, jak je znázorněno níže na obr. 13 a 14. S růstem množství metakaolinu se zvyšuje míra protipožární odolnosti. Požární odpor však není závislý na změně množství křemičitanu sodného.



Obr. 13 Vliv obsahu metakaolinu na protipožární odolnost [16]



Obr. 14 Vliv obsahu křemičitanu na protipožární odolnost [16]

Bylo zjištěno, že přidáním granulované vysokoteplné strusky do geopolyméru mohou být vyrobeny díly pro stavební účely. Tyto geopolymery mají velký potenciál pro inženýrské aplikace [16].

3.4. OSB deska

OSB (*Oriented strand board*) je zkratkou pro orientované dřevo-štěpkové desky, které jsou produktem na bázi dřeva ve formě plošně slisované třívrstvé desky. OSB sestává z dlouhých plochých štěpek, které, s použitím speciálních vodo-odolných syntetických pryskyřic, se slisují pod vlivem vysokého tlaku a teploty a válcováním za tepla vytvoří desku. Je to konstrukční deska na bázi dřeva vyvinutá speciálně pro stavebnictví [18]. OSB desky jsou díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem (odolnost proti vlhkosti vzduchu, nízká absorpční schopnost a bobtnavost, vysoká trvanlivost) vhodné pro stavby z rámových či sendvičových konstrukcí, jako podlaha, zdi nebo střechy [18].

Typy OSB desek:

OSB desky se dělí na čtyři základní skupiny podle typu oblasti použití [19]:

- ✓ OSB/1 – desky pro všeobecné účely a pro použití v interiéru v suchém prostředí (prostředí se vyznačuje vlhkostí, odpovídající teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu, která v čase několik týdnů v roce nepřekročí 65%)
 - ✓ OSB/2 – Desky pro nosné účely pro použití v suchém prostředí
 - ✓ OSB/3 – Desky pro nosné účely pro použití ve vlhkém prostředí (prostředí se vyznačuje vlhkostí, odpovídající teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu, která v čase několika týdnů v roce překročí 85%)
 - ✓ OSB/4 – Zvláště zatížitelné nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí.
- Podle rostoucího čísla typu OSB desky roste i cena. Proto jsou nejčastěji používané typy OSB/2 a OSB/3.



Obr. 15 OSB deska [19]

4. Experimentální část

4.1. Metodika práce

Experimentální část popisuje tvorbu geokompozitu s výztuží z anorganických plniv. Bylo navrženo 6 receptur, kde byla použita různá plniva. V této práci bylo zvoleno 6 druhů plniva a to popílek, technický granát HS, odpadové sklo, mleté odpady z keramiky, čedičová krátká vlákna a čedičová tkanina.

Složení jednotlivých směsí je uvedeno v tabulce 1. Byla použita komerčně dostupná surovina Baucis L160 – výrobce České lupkové závody a.s., Nové Strašecí. Samotný geopolymér byl míchán v poměru 5 hm. dílů pevné složky a 4 hm. díly kapalné složky.

Tab. 1: Receptury 1-7

vzorek 1.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	42,5%
Granulát	30%
Popílek K6	15%
Aktivátor L160	12%
Čedičová vlákna	0,5%

vzorek 2.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	60%
Keramika [40% jemná a 60% hrubá]	40%

vzorek 3.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	60%
Sklo ve formě odpadu	25%
Keramika jemná – mletý odpad	15%

vzorek 4.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	48%
Popílek K6	15%
Aktivátor L160	12%
Sklo ve formě odpadu	25%

vzorek 5.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	60%
Granát	25%
Keramika jemně mletá - odpad	15%

vzorek 6.	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	5%
Keramika [40% jemná a 60% hrubá]	40%
Čedičová vlákna – délka 3 mm, tloušťka 13 μm	1%

vzorek 2. s tkaninou	
Složky geokompozitu:	procentní hmotnost
Čistý geopolymér [cement baucis L160 a aktivátor baucis L160]	60%
Keramika [40% jemná a 60% hrubá]	40%
Čedičová tkanina – plátňová vazba, plošná hmotnost 280 g/m ² mezivrstva mezi geopolymér a desku	-

Postup práce je uveden níže:

Ze všech směsí byly vytvořeny dva druhy vzorků:

- ✓ Pro zkoušení mechanických vlastností
- ✓ Pro zkoušení požární odolnosti po nátěru na OSB desku

Dle navržených receptur byly vytvořeny vzorky odlitím do plastové formy. Vzorky byly určeny pro hodnocení fyzikálně – mechanických vlastností a jejich struktury. Tyto vzorky zrály po dobu 28 dní při laboratorní teplotě. Po 7 dnech byly vzorky odformovány a zbytek doby (21 dnů) zrály na vzduchu. Od každé směsi bylo vytvořeno 12 vzorků. Po uplynutí této doby byly v u vzorků stanoveny rozměry. Celkový počet vzorků byl rozdělen na tři skupiny:

- ✓ 1. skupina po 4 vzorcích byla ponechána bez tepelné úpravy,
- ✓ další 4 vzorky z každého druhu byly umístěny do pece, kde byly zahřívány na teplotu 850°C po dobu 60 min. Zkušební pec je na obr. 16. Náběh teploty byl 15°C/minutu a po dosažení požadované teploty následovala teplotní izoterma po dobu jedné hodiny. Po dosažení stanoveného času byly vzorky ponechány v peci, kde pomalu chladly. Pak byly znovu stanoveny rozměry. Takto připravené vzorky byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Po stanovení mechanických vlastností (pevnost v tlaku) byla provedena analýza struktury vzorků pomocí rastrovací elektronové mikroskopie.
- ✓ Ostatní vzorky byly použity pro hodnocení nasákavosti. Vzorky byly rozbity a umístěny do nádoby s destilovanou vodou. Zde byly úlomky ponechány po dobu 24 hodin k nasáknutí vodou. Po uplynutí doby se úlomky zvážily a umístily se do sušárny, kde byly ponechány při 110°C po 24h. Po vyjmutí ze sušárny byly úlomky zváženy. Výpočet nasákavosti byl proveden dle vztahu:

$$NV = \frac{[m_n - m_s]}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

Kde: NV je nasákavost v %

m_n je hmotnost nasyceného vzorku (g)

m_s je hmotnost vysušeného vzorku (g)

Podle výše uvedeného složení 6 receptur byly namíchány směsi, které byly naneseny slabou vrstvou o tloušťce asi 3 – 4mm na OSB desku. Vzorky na OSB deskách byly ponechány 7 dní pod fólií při pokojové teplotě a 21 dní zrály rovněž při pokojové teplotě. Pak byla provedena zkouška prohoření pomocí plamenu plynového hořáku.

Dále byly připraveny vzorky pro zkoušky adhezni pevnosti geopolyméru na desce OSB. Zkoušky byly připraveny podobně, jak je uvedeno v ČSN 73 2577 Stanovení přídržnosti

povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu pouze s tím rozdílem, že měřená místa nebyla vyřezána ve vrstvě geopolyméru, ale vrstva byla nanesena na desku přímo ve válcové formě o průměru 65mm.



Obr. 16 Pec HT Ceramic – použitá pro teplotní expozici



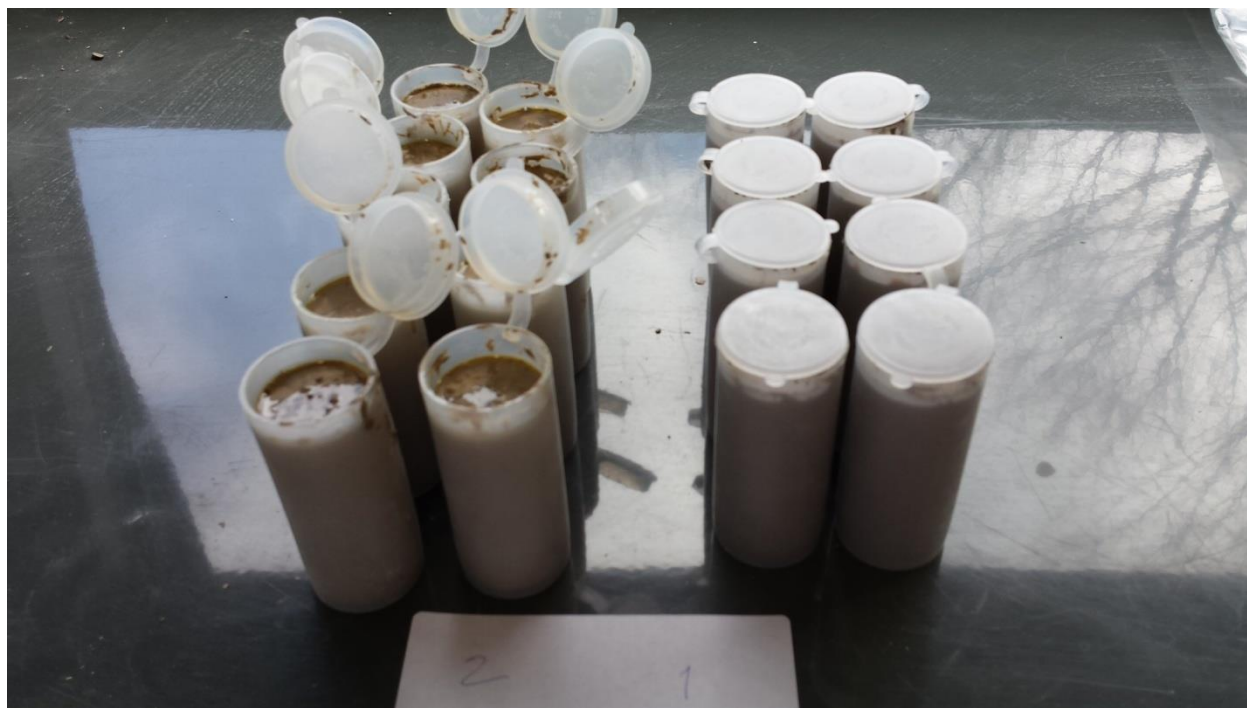
Graf. 1 Křivky teplotní expozice

4.1.1. Příprava geopolymerní směsi

Směsi byly připravovány metodou, kdy se nejprve smíchal cement Baucis L160 složka A a aktivátor Baucis L160 složka B v poměru, které je doporučeno výrobcem BAUCISU L160 – České lupkové závody, a.s. Nové Strašecí. (čistý geopolymér L160) , a to 5 hm. dílů cementu a 4 hm. díly aktivátoru. Po dosažení homogenní směsi byla přidána plniva a (popř.) další menší množství aktivátoru Baucis L160 složka B (pokud bylo nutné). Směs byla dále míchána do dosažení homogenní směsi.

➤ *Příprava vzorků do plastové formy*

Zkušební vzorky pro zkoušku tvrdosti a pevnosti v tlaku i hodnocení změny struktury byly zhotoveny odlitím do plastové formy z polypropylenu o průměru 28,5 mm a výšce 70 mm. Homogenně namíchaná směs byla nalita do forem a na vibračním zařízení byla zbavena převážné části vzduchových bublin. Tvrdnutí vzorků probíhalo při laboratorní teplotě s uzavřeným víčkem ke zpomalení vysychání. K vyjmutí vzorků z forem došlo po 7 dnech. Další tvrdnutí probíhalo při laboratorní teplotě bez dalšího vlhčení až do 28 dne po odlití.



Obr. 17 Formy pro přípravu vzorků s nalitou směsí

➤ *Příprava slabé vrstvy na desky pro zkoušku žárové odolnosti*

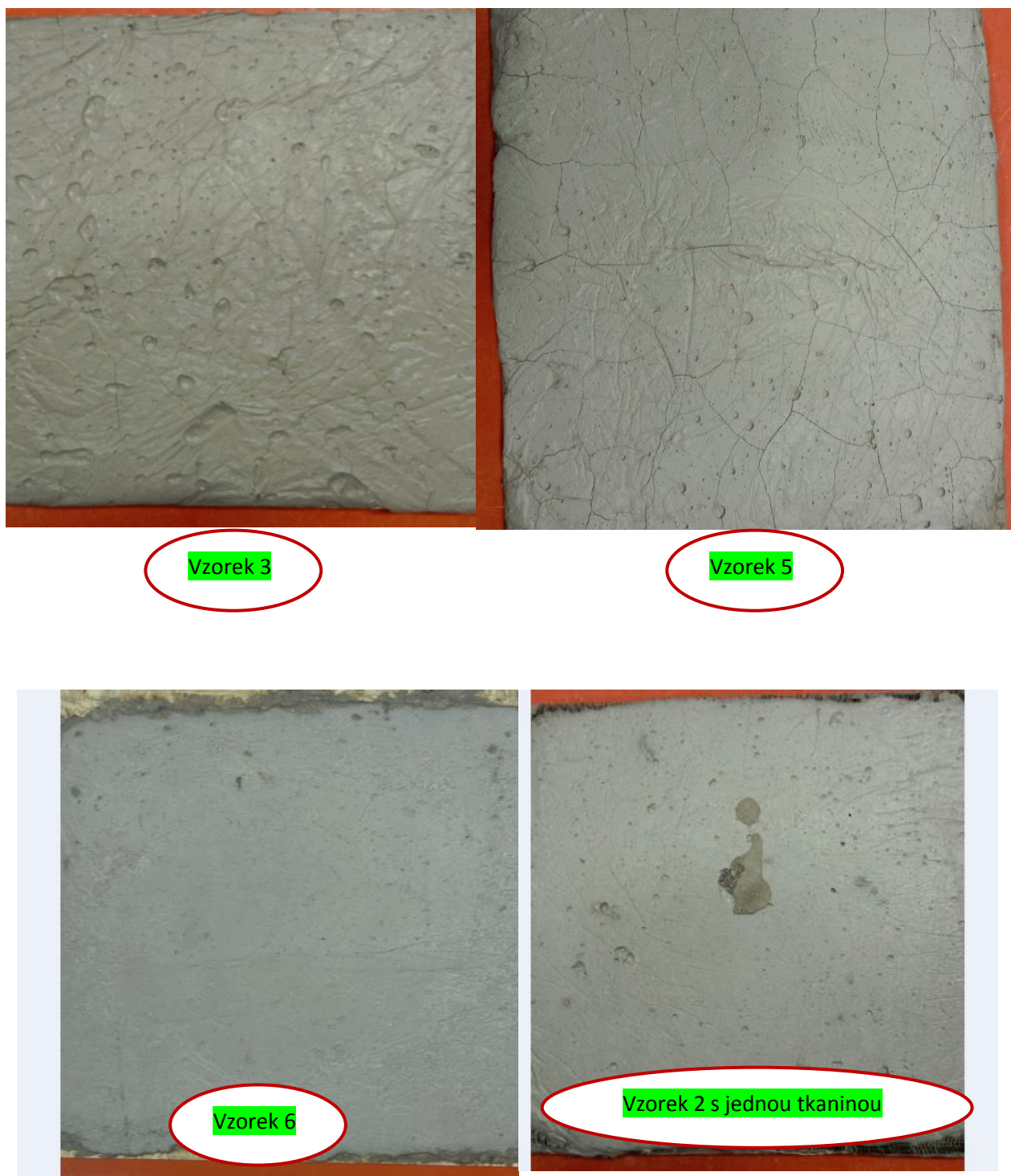
Po zkoušce nanášení na neupravený povrch desek OSB o rozměru 30 x 30 x 2 cm, kdy bylo zjištěno, že povrch desek je nesmáčivý, bylo přistoupeno k úpravě povrchu desek broušením se současným odstraněním prachu, aby byla zaručena lepší adheze malty k substrátu. Nanesení vrstvy geopolyméru na desku bylo provedeno ve 2 fázích:

- V první fázi byla nanесena velmi slabá vrstva geo-malty (směsi) na desku jako přípravná vrstva. Tato byla ponechána při laboratorní teplotě po 24 hodin do její vysušení.
- v druhé fázi byla na desku nanесena slabá vrstva s tloušťkou 3 – 4 mm. Jejich vytvrzení probíhalo při laboratorní teplotě, deska byla zakryta folií ke zpomalení vysychání.

Průběh tvorby slabé vrstvy na desce podle podle výše uvedeného popisu byl zvolen proto, aby byla omezena tvorba povrchového popraskání a zvýšení adheze geopolyméru na desce. Po 7 dnech byla deska odkryta a zrání probíhalo dalších 21 dní. Po 28 dnech byly vzorky zkoušeny v testu prohoření, jak je vidět na obrázku 18. Celkem jsou 7 vzorky ale na obrázku 19 se zobrazeny 5 vzorky z důvodů pohledu povrchu ostatního vzorků jsou analogický.



Obr. 18 Postup vytvoření vrstvy na desce OSB; A) natření první vrstvy; B) 1. vrstva po 24 hodinách; C) Natření druhé vrstvy; D) Suché vrstvy po 7 dnech



Obr. 19 Pohled povrchu vzorků po 28 dnech

➤ *Příprava vzorků pro test adhezní pevnosti*

V této části je uveden popis provedení přilnavosti malty k povrchu dřevěných desek. Připravená geopolymerní malta se vlije do připravených forem o průměru 65mm, které jsou uloženy na povrchu desky, a to 3 zkušební vzorky od každé směsi. Adhezní pevnosti byla zjišťována zkouškou v tahu na přístroji P 100 Labtest II tak, že na vzorky byly nalepeny lepidlem CHS epoxy 1200 přídržné elementy, které pak sloužily k upnutí vzorků do horní čelisti. Spodní část vzorků (deska) byla uchycena svěrkami k příčičku stroje.

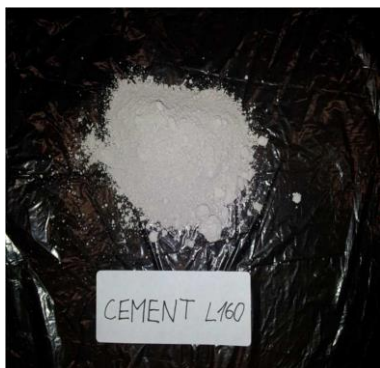


Obr. 20 Připravené vzorky pro zkoušku adhezní pevnosti

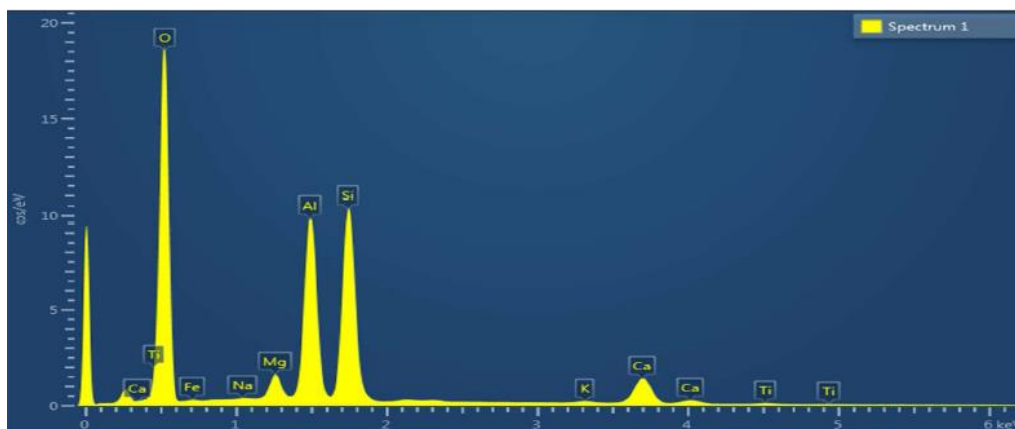
4.2. Charakteristika použitých surovin

4.2.1. Cement Baucis L160 a Pojivo L160

Byl vybrán geopolymer s obchodním označením Baucis L160, který vzniká smícháním dvou složek. Pevnou složkou je cement L160 a kapalnou složkou je roztok vodního skla a NaOH s názvem aktivátor L160. Tento geopolymerní materiál s označením BAUCIS L160 má poměr Si:Al \approx 2:1. Výrobce Geopolymeru jsou ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY a.s.

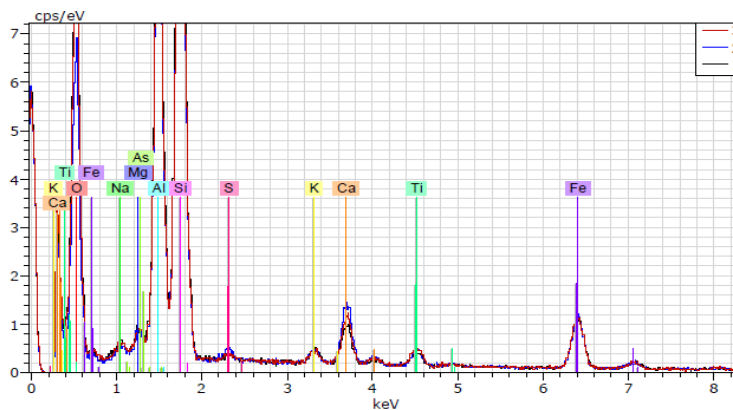
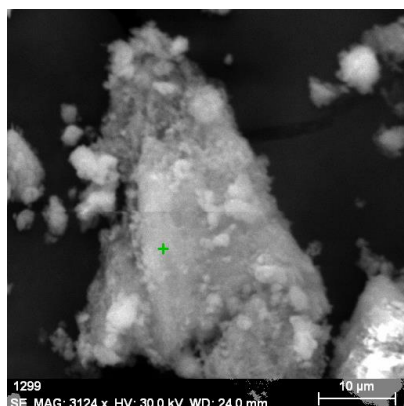


Obr. 21 Složky BAUCISU L160: Cement L160 – aktivovaný metakaolin (vlevo),
Pojivo L160 – alkalický aktivátor (vpravo).



Obr. 22 Energetické spektrum EDX aktivovaného metakaolinu – Cement
L160.

4.2.2. Elektrárenský popílek – popílek K6



Obr. 23 SEM fotografie popílku K6-LF a odpovídající chemické složení

4.2.3. Technický granát HS



Obr. 24 Technický granát HS

Technický granát HS je přírodní minerální abrazivo s vysokou tvrdostí. Je používán rovněž pro pískování, ostrykávání a jako abrazivo pro řezání vodním paprskem. Dodává jej firma Chejn, s.r.o., Sušice. Velikost zrn je 3 – 8 mm.

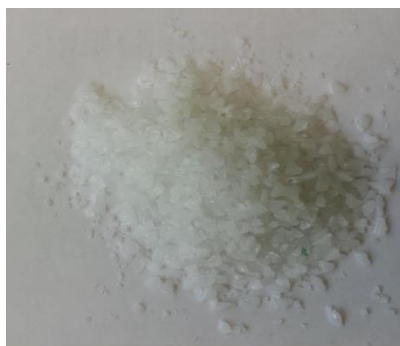
4.2.4. Mleté odpady z keramiky



Obr. 25 Mleté odpady z keramiky

Jedná se o mletou karamiku z firmy Elektroporcelán Louny. Keramika je připravována mletím v kulových mlýnech a tříděna proséváním na frakce. Pro geopolymery byla použita frakce 2 – 5 mm a 5 – 8 mm.

4.2.5. Odpadové sklo



Obr. 26 Odpadové sklo

Jedná se o odpadové sklo z firmy Preciosa, a.s. Liberec z mačkání korálků. Odpadové není dále upravováno, má hladké hrany a velikosti zrn je 3 – 6 mm.

4.2.6. Krátké čedičová vlákna



Obr. 27 čedičová krátká vlákna

Tab. 2 Hlavní vlastnosti krátkých čedičových vláken (3.2mm)

Vlákna	D [μ m]	Hustota [kg/m ³]	Délka [mm]	Modul [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení [%]
čedičová	13	2 880	3	89	4,8	1,4

4.2.7. Tkaniny čedičové



Obr. 28 Čedičová tkanina

Čedičová tkanina je utkána v plátnové vazbě a má plošnou hmotnost 280 g/m²

4.3. Tlaková zkouška geokompozitu

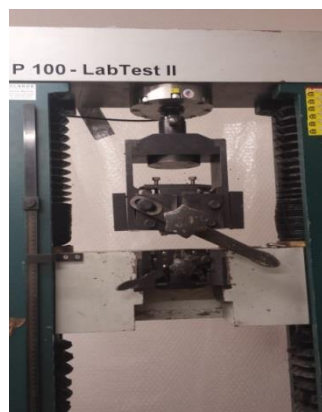
Pevnost v tlaku byla stanovena podle EN ČSN 197-1 po 28 dnech vytvrzované při laboratorní teplotě, a při 850°C za jednu hodinu podrobené tepelné zátěži. Pevnost v tlaku se měřili na přístroji P100-Labtest II s rozsahem měření 0 – 100kN.

Vzorky při zkoušce v tlaku se musí upravit tak, aby oba podstavy válec byli rovnoběžné a rovné. Vzorky se postupně zatěžovali. Zatěžování bylo plynulé, ukončené při destruktivní vzorku a určila se maximální síla. Smluvná pevnost v tlaku byla určena ze vztahu :

$$R = \frac{F_{max}}{S_o}$$

Kde: F_{max} – maximální síla při porušení vzorku [N]

S_o – zatěžovaná plocha [mm²]

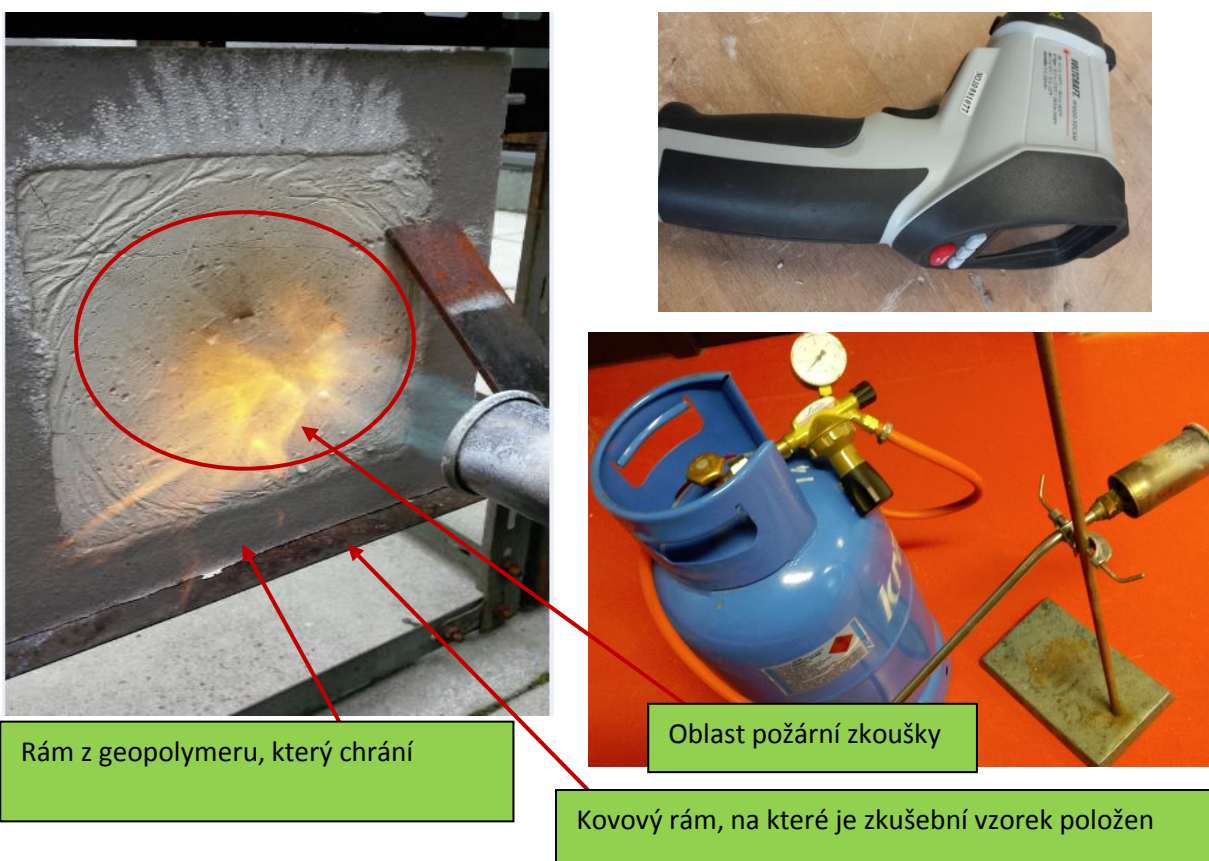


Obr. 29 zkouška pro vyhodnocení pevností v tlaku na přístroji P100-Labtest II

4.4. Zkouška prohoření OSB desky

Zkouška zajistění prohoření desky OSB se probíhala plamenem z plynového hořáku. Vzorek byl umístěn na kovového rámu. Poté hořák, který je připojen na plynové láhvi, je umístěn před deskou o vzdálenosti 15 cm.

Teplota na povrch substrátu za strany plamene se rychle zvýšila. Po dvěma minutami teplota stoupla z teploty okolí (okolní teplota je teplota, která byla měřena v době, když začíná zkoušet vzorek) na teplotu přibližně 760°C a po 4 minutami se teplota dosáhla nad 800°C a po této době teplota zvýšila pomalu a maximální hodnota teploty byla přibližně 860°C za 30 minut a to ještě vydrží během hoření. Pro měření teploty bylo použito teploměr.



Obr. 30 Příprava a umístění pro proces požární zkoušky

4.5. Zkouška adhezní pevnosti

Tahová zkouška byla zvolena jako vhodná metoda k vyhodnocení adhezní pevnosti. Vzorky byly testovány po 28 dnech při laboratorní teplotě na univerzální přístroji P100-Labtest II.

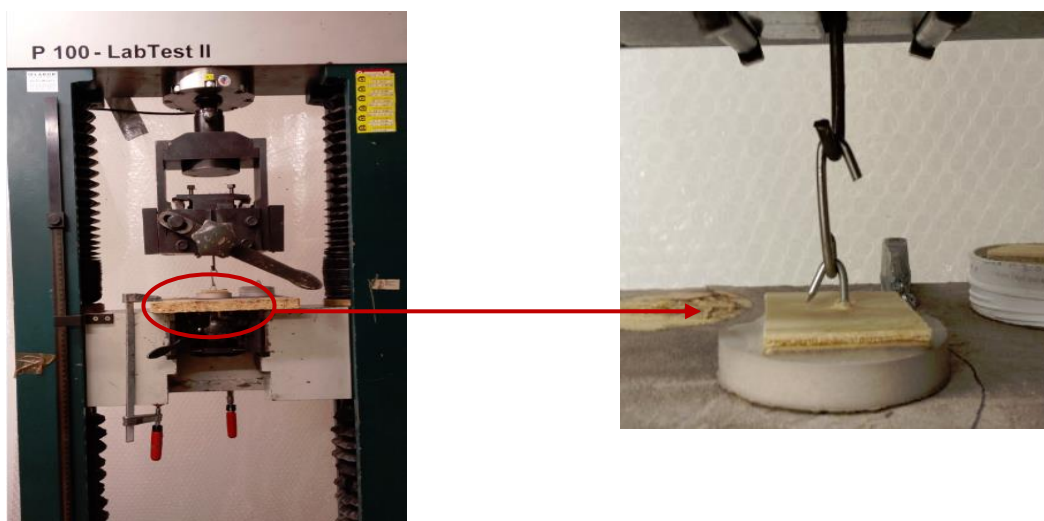
Použitý vzorek pro výpočtu adhezní pevnosti:

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa]$$

Kde: σ je tahová pevnost [MPa]

$S = \pi \cdot d^2 / 4$ je průřez vzorku [mm^2]; d je průměr vzorku

F je tahová síla, která vychází z průběhu měření [N]



Obr. 31 zkouška pro vyhodnocení adhezní pevnosti na přístroji P100-Labtest II

4.6. Pozorování mikrostruktury vzorků

Na povrchu vzorků lze sledovat velikost a množství prasklin v matrici a adhezi plniv k matrici geopolyméru. K hodnocení jsou vzorky určeny před tepelným zatížením a po zatížení.

Odběr vzorků byl stanoven na zbylých úlomcích po zkoušce pevnosti v tlaku. Veškerá pozorování je prováděno na elektronovém skenovacím mikroskopu *Carl ZEISS Ultra* + s mikroanalytickými detektory Oxford, které byly využity ke stanovení chemického složení čistého geopolyméru a složení sypané části geopolyméru Cement L160 – EDX analýza.



Obr. 32 Rastrovací elektronový mikroskop Carl ZEISS Ultra+.

5. Výsledky a vyhodnocení

5.1. Adhezní pevností

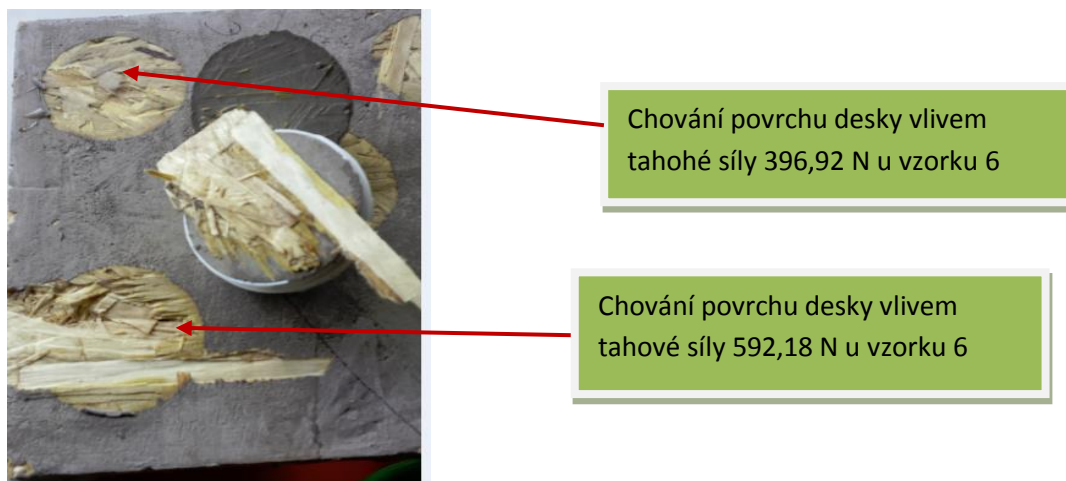
Tab. 3 shrnuté výsledky z adhezní pevností

Druh materiálu	Číslo vzorku	Průměr D [mm]	Průřez S [mm ²]	Síla [N]	Tlaková napětí [MPa]
Vzorek 1	1	65	3316,63	569,75	0,17
	2	65	3316,63	590,54	0,18
	3	65	3316,63	330,98	0,10
Průměrná hodnota		-	-	497,09	0,15±0,04
Vzorek 2	1	65	3316,63	495,63	0,15
	2	65	3316,63	550,32	0,17
	3	65	3316,63	350,78	0,11
Průměrná hodnota		-	-	465,58	0,14±0,02
Vzorek 3	1	76	4534,16	506,67	0,11
	2	75	4415,63	541,59	0,12
	3	75	4415,63	510,78	0,11
Průměrná hodnota		-	-	519,68	0,12±0,005

Vzorek 4	1	65	3316,63	525,20	0,16
	2	65	3316,63	453,22	0,14
	3	65	3316,63	379,82	0,11
Průměrná hodnota		-	-	452,75	0,14±0,02
Vzorek 5	1	65	3316,63	287,18	0,09
	2	65	3316,63	463,2	0,14
	3	65	3316,63	443,96	0,13
Průměrná hodnota		-	-	398,11	0,12±0,02
Vzorek 6	1	65	3316,63	592,18	0,18
	2	65	3316,63	575,79	0,17
	3	65	3316,63	396,92	0,12
Průměrná hodnota		-	-	512,63	0,16±0,03

Vyhodnocení

Z hodnot v tab. 3 je vidět, že adhezní pevnost vzorků je poměrně rovnoměrná. Nejlepší pevnost byla zjištěna u vzorku 6 s hodnotou 0,16 MPa a nejnižší pevnost byla zjištěna v vzorku 3 a u vzorku 5 s hodnotou 0,12 MPa. Adhezní pevnost povlaku na desku OSB byla závislá na umístění na povrchu desky, protože stějnóměrnost povrchu desky OSB není po celé ploše stějný. Místo, kde obsahuje menší množství štěpek způsobuje horší adhezi a naopak.

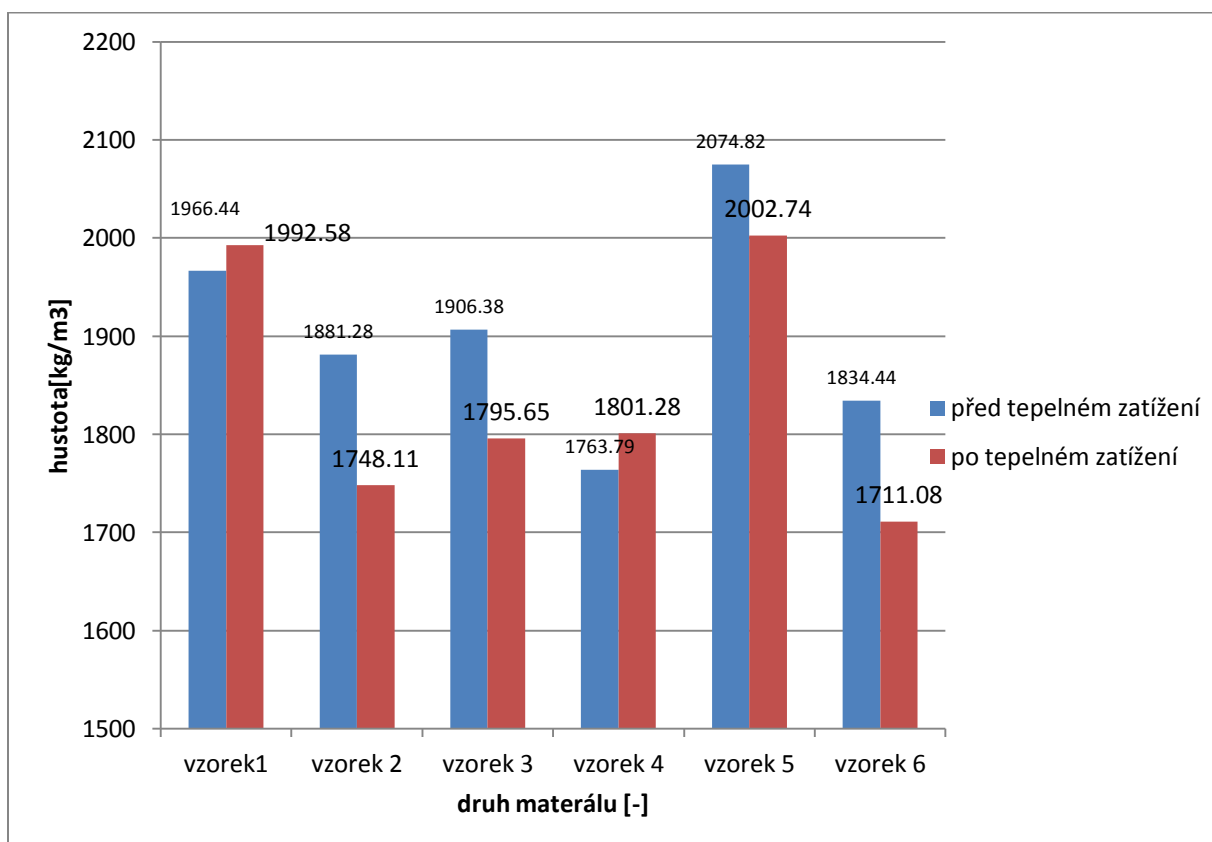


Obr. 33 Pohled na zkušební vzorky po odtrhové zkoušce na přístroji P100-Labtest II

5.2. Objemové hmotnost

Tab. 4 shrnuté výsledky z změny objemové hmotnosti

Druh materiálu	Hustota [kg/m ³] před tepelnou expozicí	Hustota [kg/m ³] po tepelné expozici
Vzorek 1	1966.44	1968.65
Vzorek 2	1881.28	1748.11
Vzorek 3	1906.38	1795.65
Vzorek 4	1763.79	1801.28
Vzorek 5	2074.82	2002.74
Vzorek 6	1834.44	1711.08



Graf. 2 Změna objemové hmotnosti vzorků po vystavení teplotné expozici

Vyhodnocení

Z grafu 2 je vidět, že hustota vzorku 1 a vzorku 5 se po tepelném zatěžování 850°C zvyšuje, zatímco u ostatních vzorků hustota klesá. Přítomnost popílku lze považovat za příčinu zvýšení hustoty u vzorku 1 a u vzorku 4. Popílek je plnivo, které absorbuje více vody během výroby geokompozitu a po tepelném zatěžování došlo ke změně rozměrů vzorku tak, že se vzorky smrštily. To je způsobeno odpařením vody. Tím bylo způsobeno zvýšení hustoty.

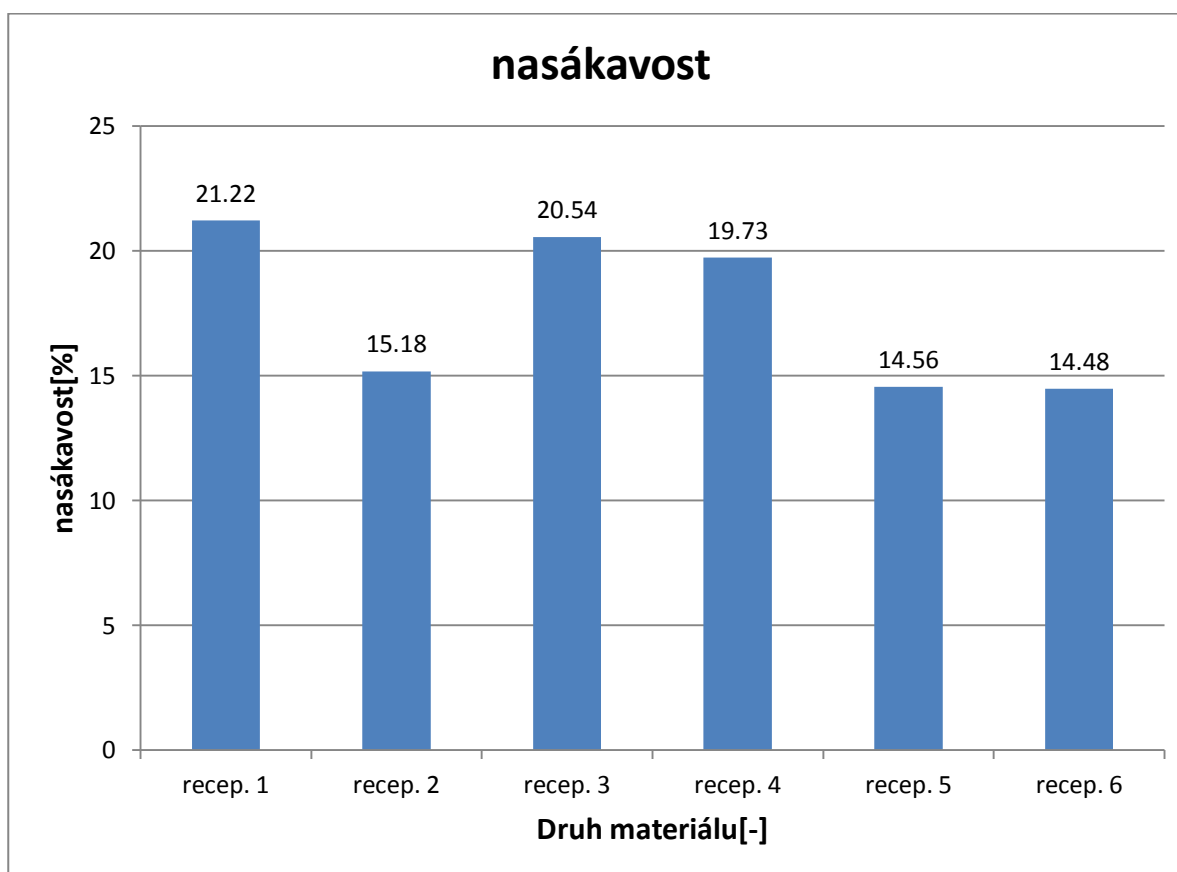
5.3. Nasákavost

Tab. 5 shrnuté výsledky ze zkoušení nasákavosti

	Číslo vzorků	m_n [g]	m_s [g]	NV[%]
Vzorek 1	1	36,27	29.83	21.59
	2	36,57	30.10	21.50
	3	34,26	28.41	20.60
	Průměrná hodnota	21.23 [%]		
Vzorek 2	1	43,53	37.91	14.82
	2	37,40	32.38	15.50
	3	38,83	33.70	15.22
	Průměrná hodnota	15.18 [%]		
Vzorek 3	1	34,40	28.36	21.30
	2	31,34	26.39	18.98
	3	45,62	37.60	21.33
	Průměrná hodnota	20.54 [%]		
Vzorek 4	1	33,80	28.29	19.48
	2	34,39	28.79	19.45
	3	36,50	30.35	20.26
	Průměrná hodnota	19.73 [%]		
Vzorek 5	1	45,28	39.69	14.08
	2	41,31	35.92	15.01
	3	43,89	38.30	14.60
	Průměrná hodnota	14.56 [%]		
Vzorek 6	1	39,53	34.52	14.51
	2	39,23	34.30	14.37
	3	37,44	32.68	14.57
	Průměrná hodnota	14.48 [%]		

Vyhodnocení

Byly provedeny experimenty k určení nasákavosti geopolyméru. Zkouška byla provedena po 28 dnech zrání při laboratorní teplotě. Výsledky v grafu 3 je patrné, že rozdílné složení nasákavost ovlivňuje. Můžeme konstatovat, že zkušební vzorky s plnivem popílku mají vyšší nasákavost než vzorky bez popílku. Nejvyšší a tedy nejhorší výsledkem má vzorek 1, kde nasákavost byla 21,22% a naopak nejlepší hodnota byla 14,48% u vzorku 6.

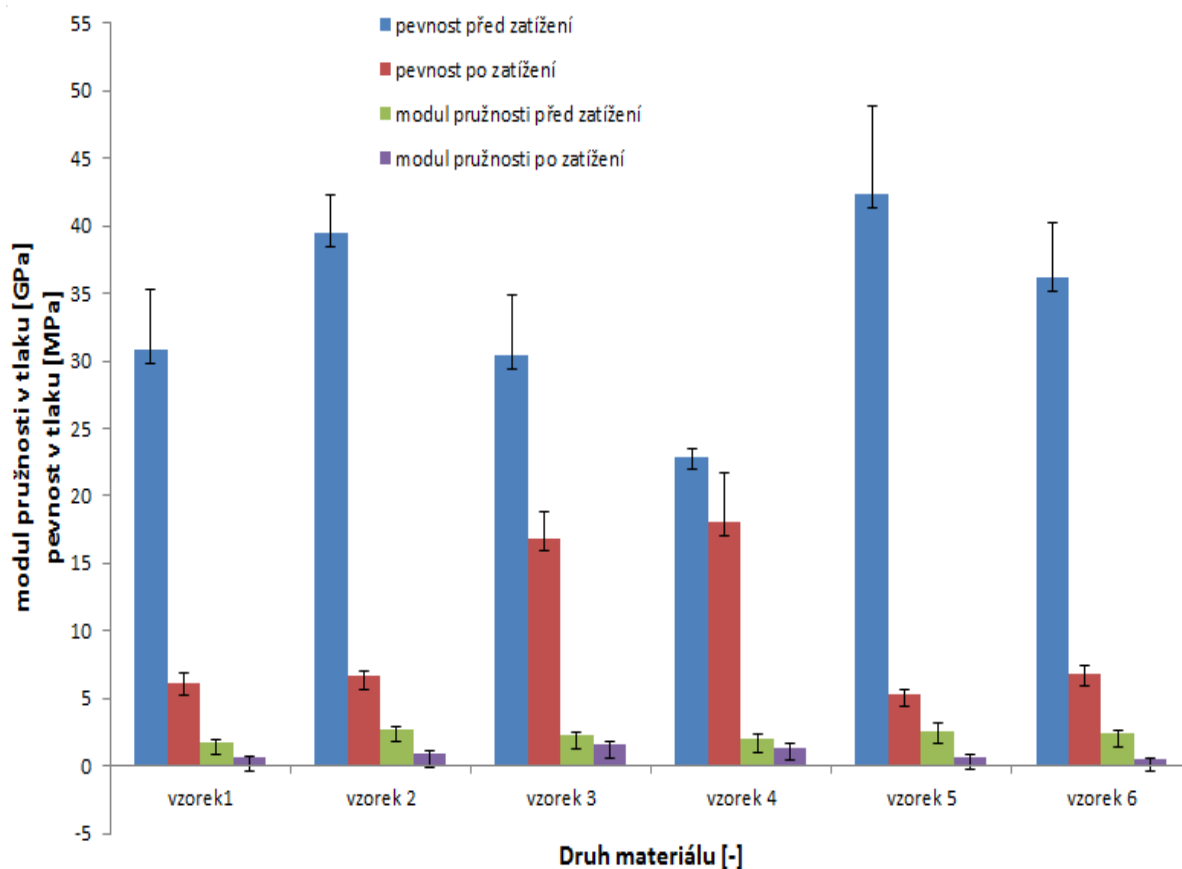


Graf. 3 nasákavost odlišné receptury po 28 dnech při laboratorní teplotě

5.4. Pevnost v tlaku

Tab. 6 shrnuté výsledky z tlakové pevností

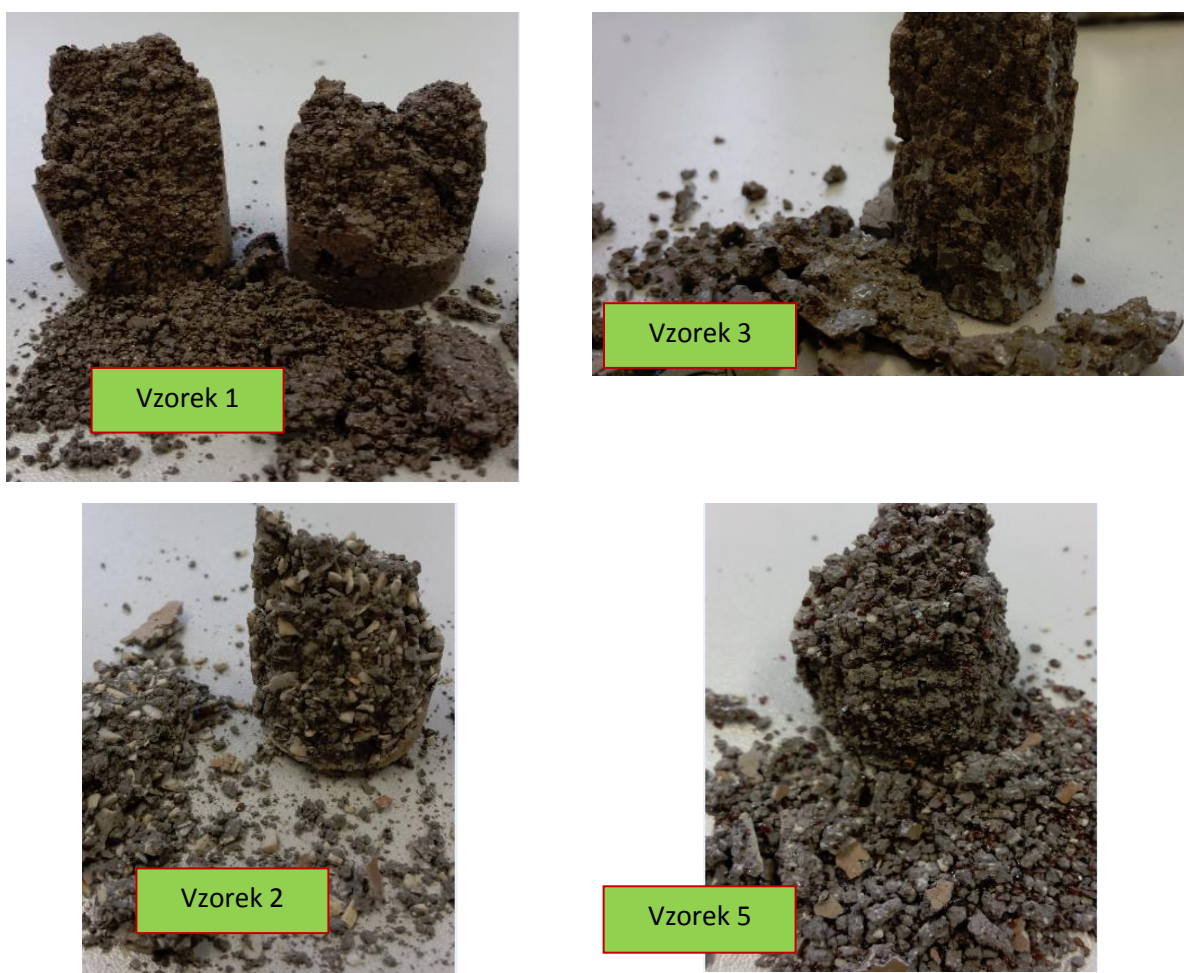
Druh materiálu	Před tepelným zatížením		Po tepelném zatížení	
	Napětí σ [MPa]	Modul E [GPa]	Napětí σ [MPa]	Modul E [GPa]
Vzorek 1	30.84 ± 4.39	1.79 ± 0.21	6.17 ± 0.70	0.58 ± 0.15
Vzorek 2	39.49 ± 2.80	2.75 ± 0.20	6.63 ± 0.42	0.94 ± 0.18
Vzorek 3	30.43 ± 4.44	2.26 ± 0.26	16.89 ± 1.95	1.63 ± 0.18
Vzorek 4	22.93 ± 0.59	2.03 ± 0.39	18.01 ± 3.64	1.39 ± 0.29
Vzorek 5	42.37 ± 6.46	2.62 ± 0.58	5.37 ± 0.27	0.7 ± 0.16
Vzorek 6	36.21 ± 3.96	2.37 ± 0.23	6.86 ± 0.60	0.55 ± 0.06



Graf 4 Porovnání pevnosti v tlaku v závislosti na teplotnímu zatížení odlišného vzorků

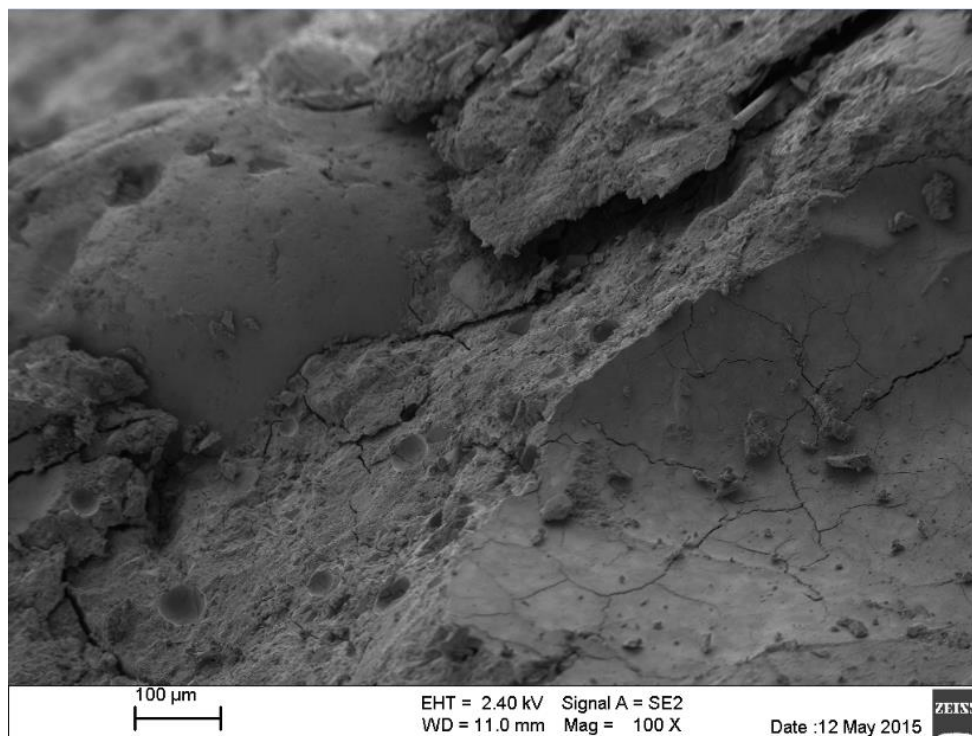
Vyhodnocení:

Z pozorování grafu 4 je patrné, že použitím různé plniva byla ovlivněna pevnost v tlaku. Po 28 dnech zrání při laboratorní teplotě největší pevnost byla u vzorku 5, nejnižší pevnost byla u vzorku 4. Nejvyšší důraz je kladen na výsledky pevností vzorku 3 a vzorku 4 po tepelném zatížení. Pokles jejich pevností nebyl příliš velký ve srovnání s ostatním vzorkem. U vzorku 3 pevnost po tepelném zatížení se snížila o 44,49% oproti pevnosti před tepelném zatížení, zatímco u vzorku 4 byla o 21,46%. U ostatních vzorků se pevnost snížila více polovinu ve srovnání s původním pevnostím, jako u vzorku 1 byla 79,99%, u vzorku 2 byla 83,21%, u vzorku 5 byla 87,33% a u vzorku 6 byla 81,05%. S tím lze říct, že tyto vzorky téměř ztratí odporu vůči vnější silám po tepelném zatížení. Pozorování vzorků po tepelném zatížení na obrázku 32 níže je vidět, že soudržnost u vzorku 3 ještě úplně dobře a opakem je u ostatním vzorků

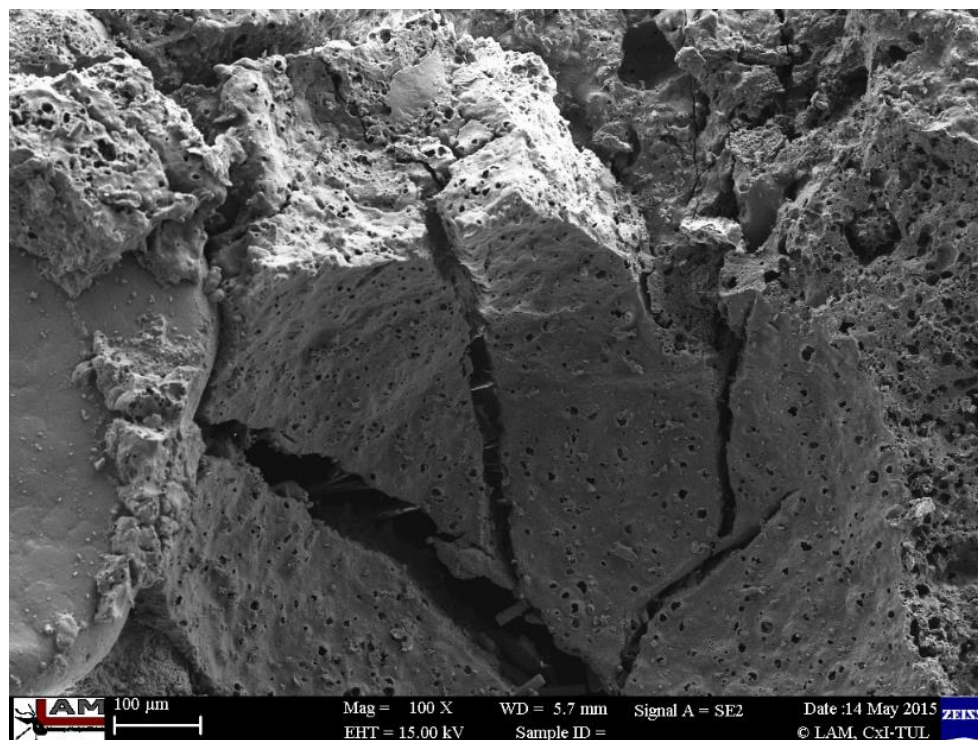


Obr. 34 Pohled vzorků v peci 850°C po tlakové zkoušce

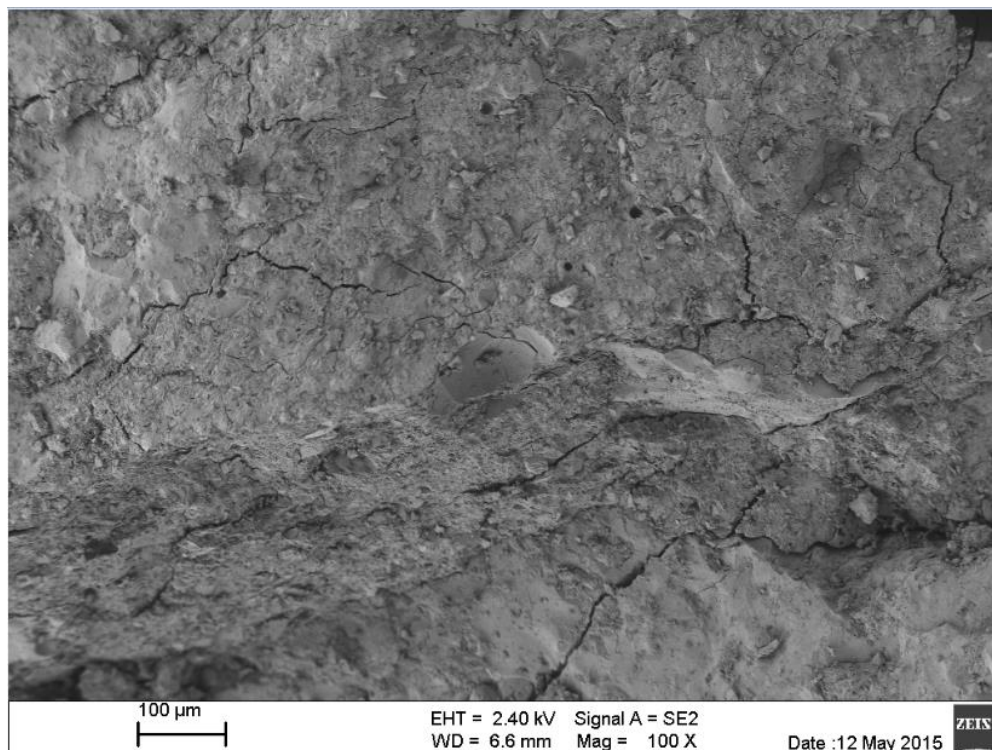
5.5. Struktura vzorek na Semku



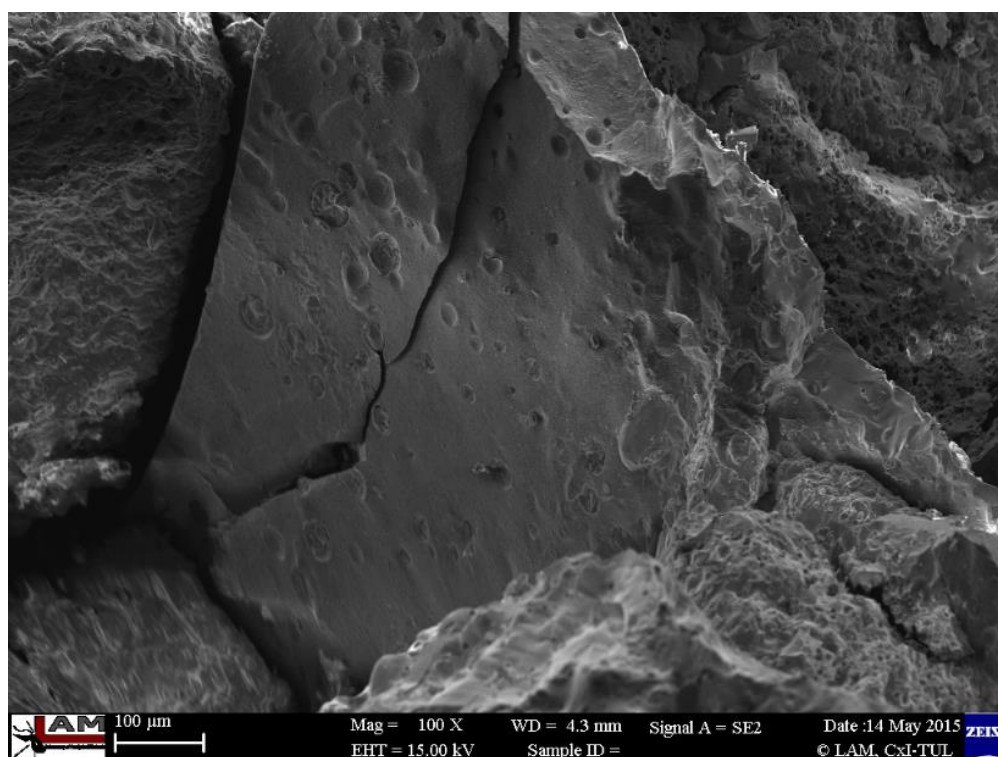
Obr. 35 Struktura vzorku 1 po 28 dnech při laboratorní teplotě



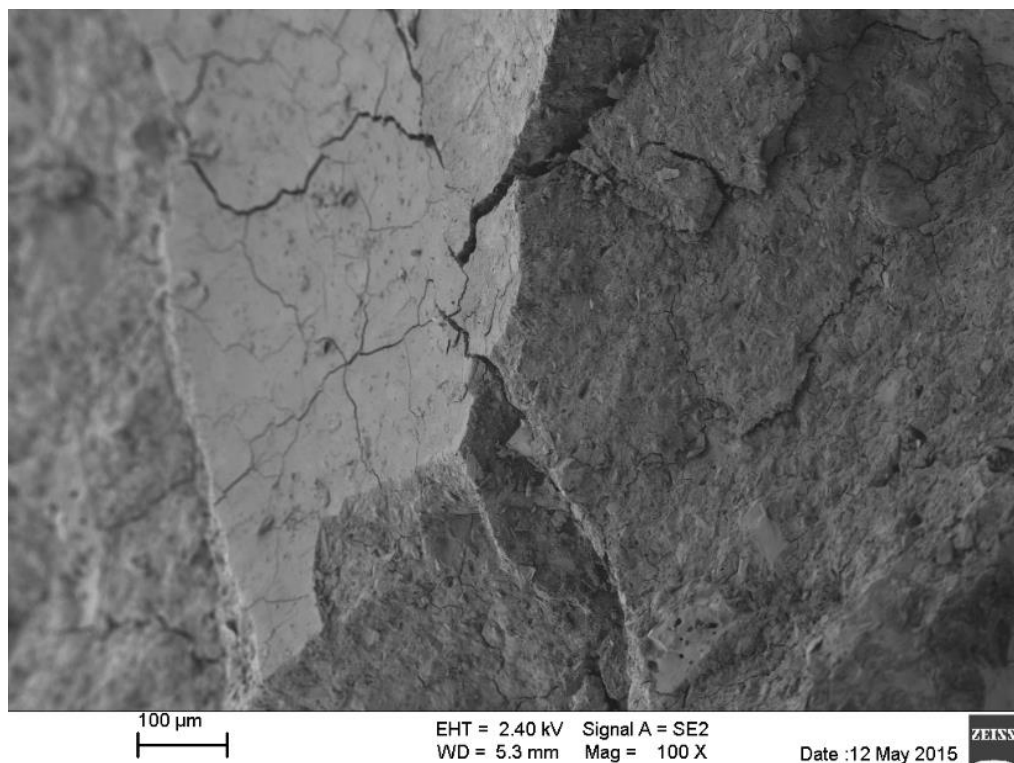
Obr. 36 Struktura vzorku 1 v teplotě 850°C za hodinu



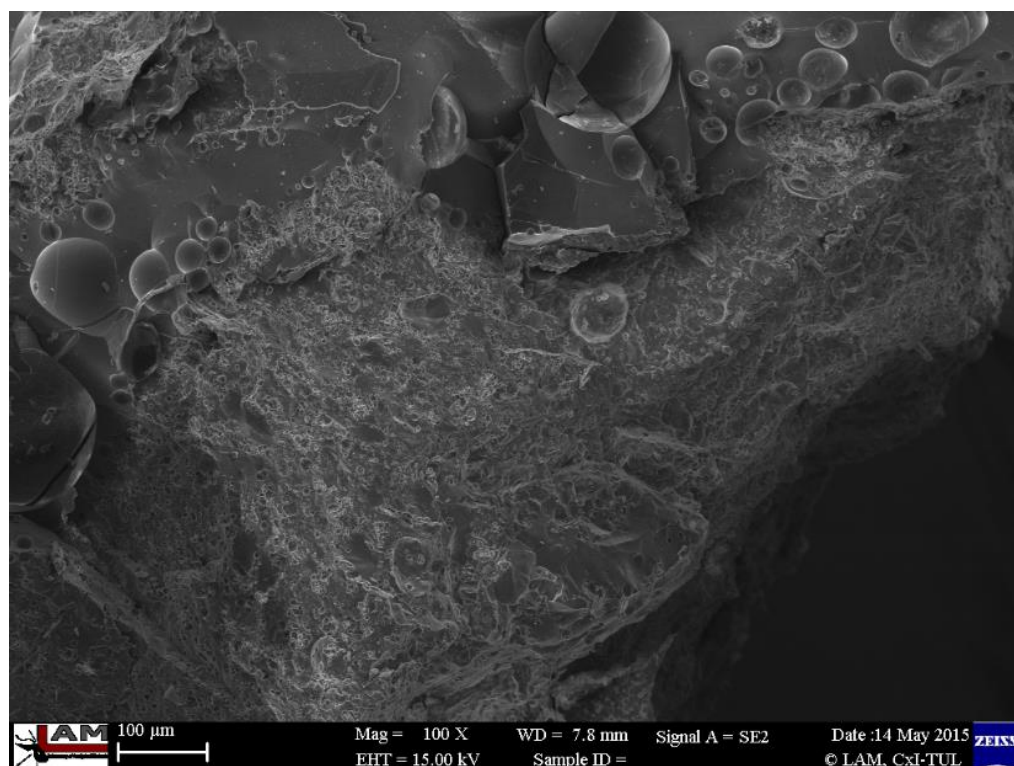
Obr. 37 Struktura vzorku 2 po 28 dnech při laboratorní teplotě



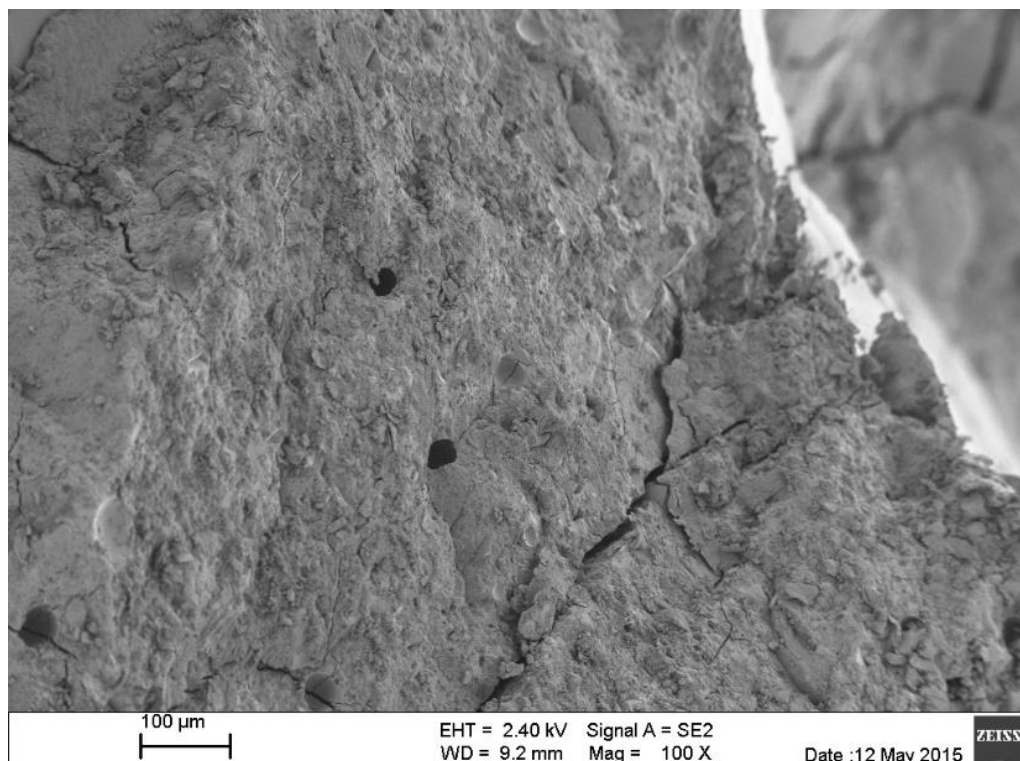
Obr. 38 Struktura vzorku 2 v teplotě 850°C za hodinu



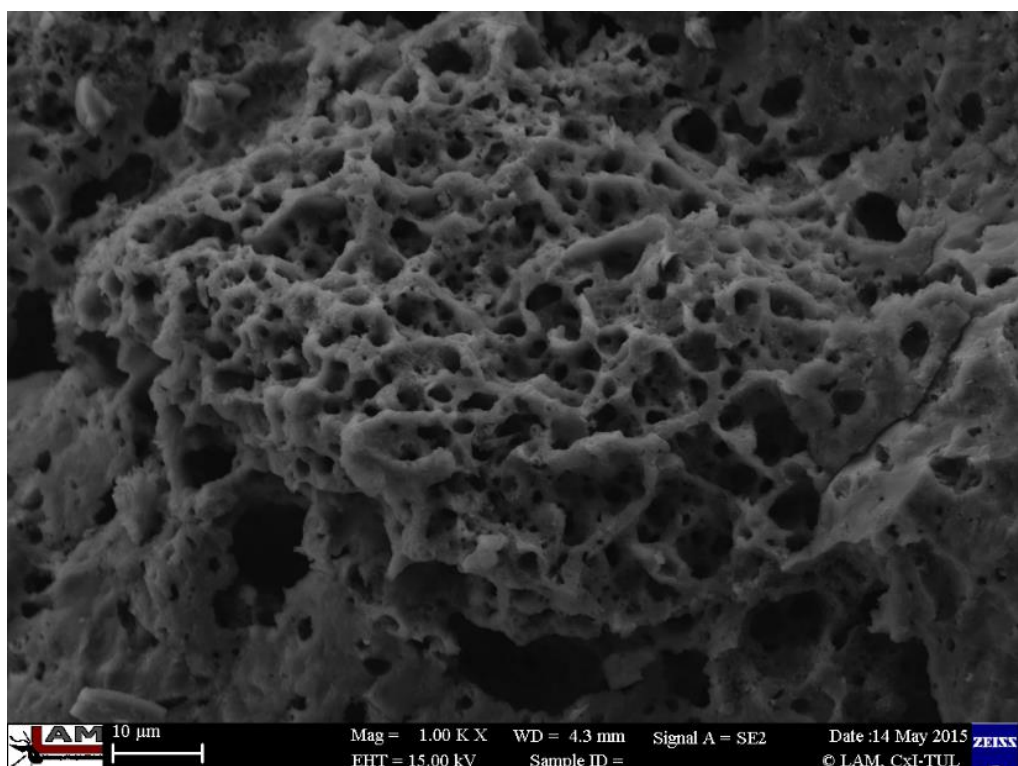
Obr. 39 Struktura vzorku 3 po 28 dnech při laboratorní teplotě



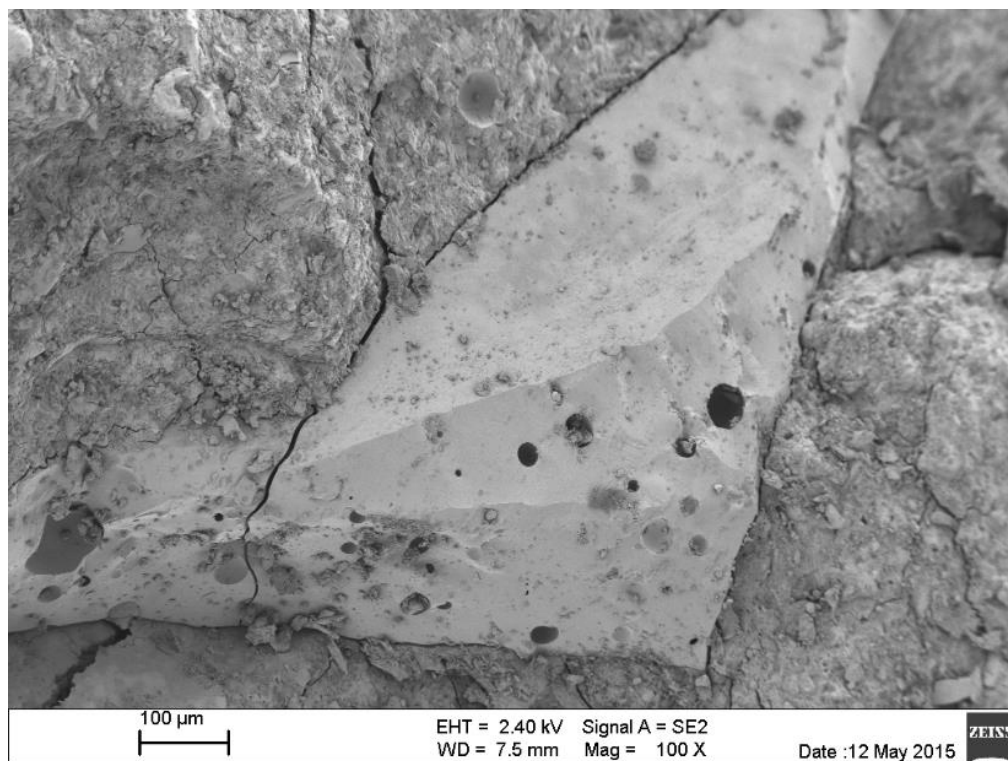
Obr. 40 Struktura vzorku 3 v teplotě 850°C za hodinu



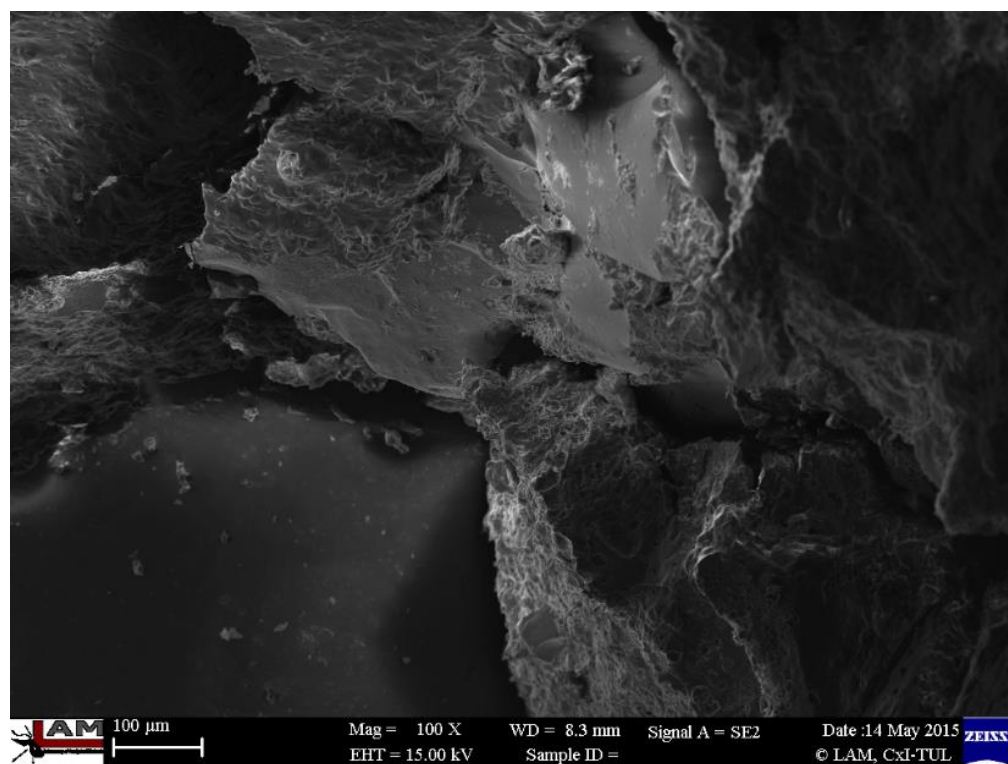
Obr. 41 Struktura vzorku 4 po 28 dnech při laboratorní teplotě



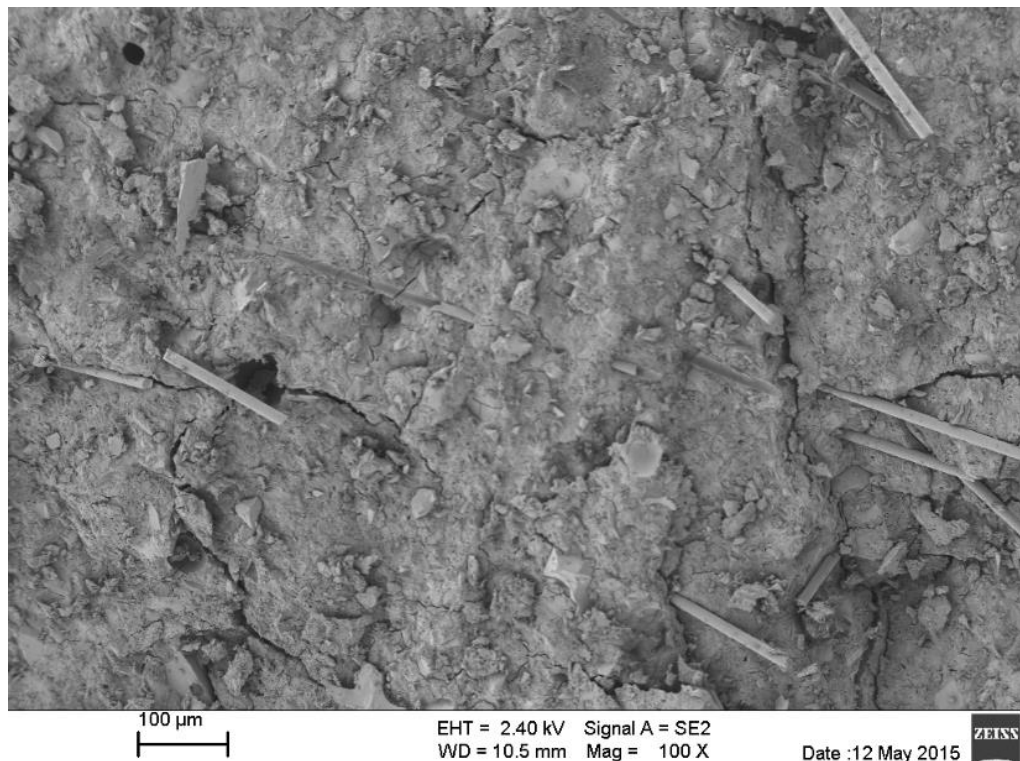
Obr. 42 Struktura vzorku 4 v teplotě 850°C za hodinu



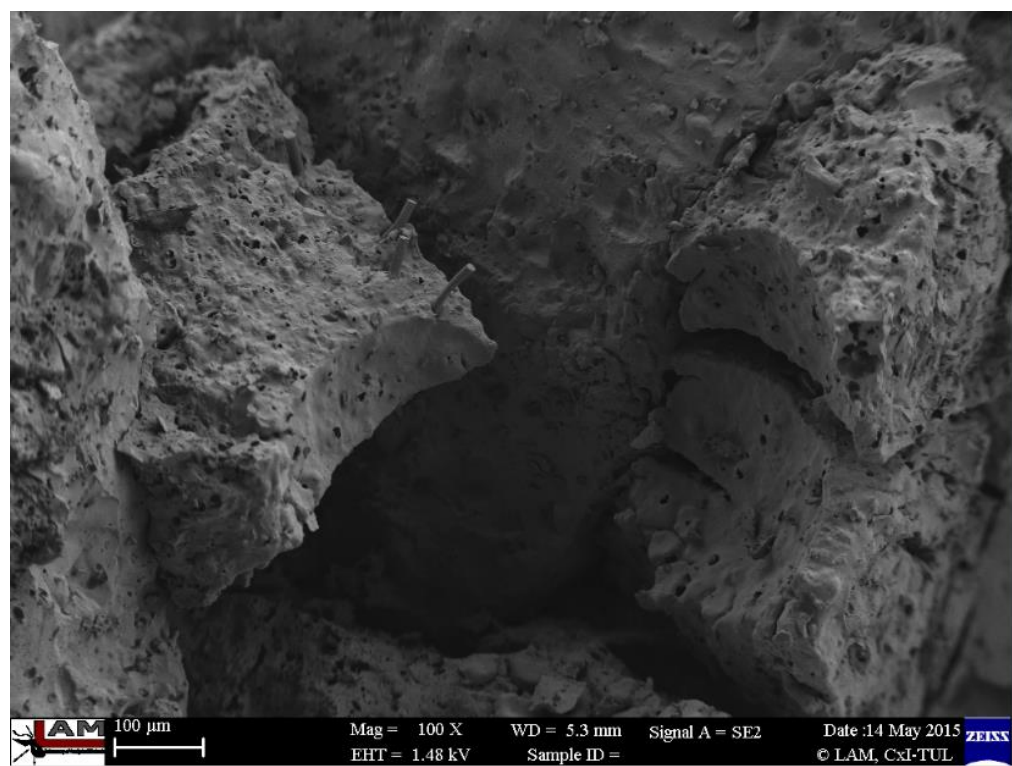
Obr. 43 Struktura vzorku 5 po 28 dnech při laboratorní teplotě



Obr. 44 Struktura vzorku 5 v teplotě 850°C za hodinu



Obr. 45 Struktura vzorku 6 po 28 dnech při laboratorní teplotě

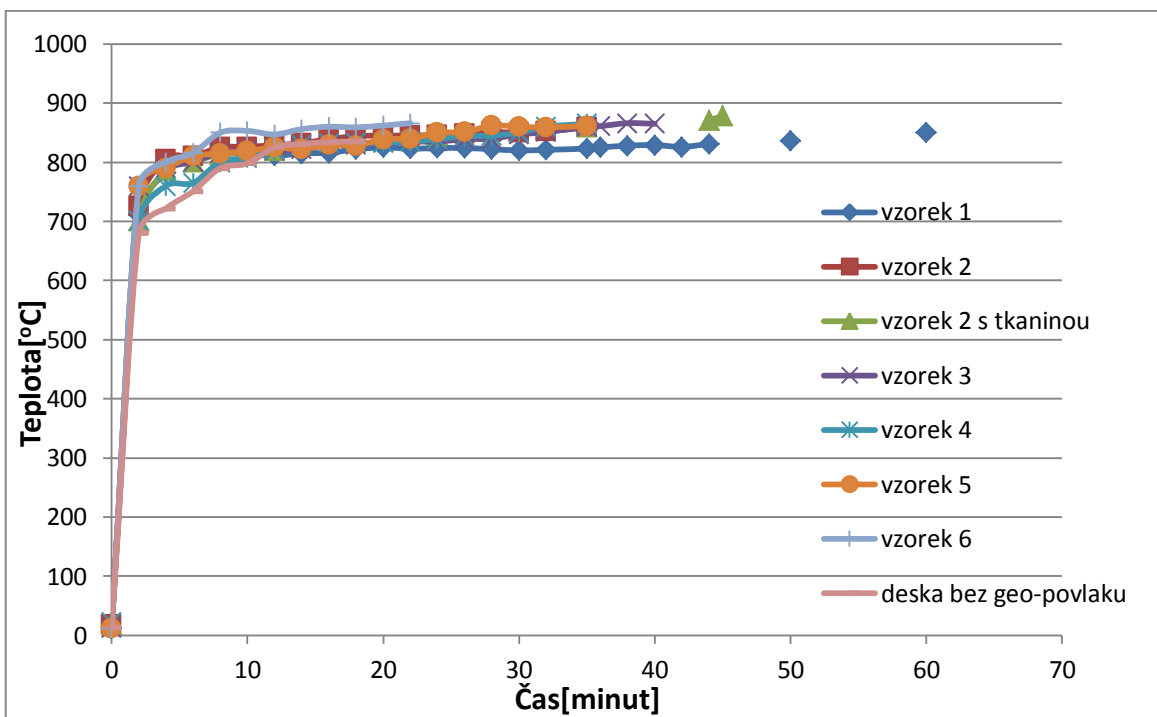


Obr. 46 Struktura vzorku 6 v teplotě 850°C za hodinu

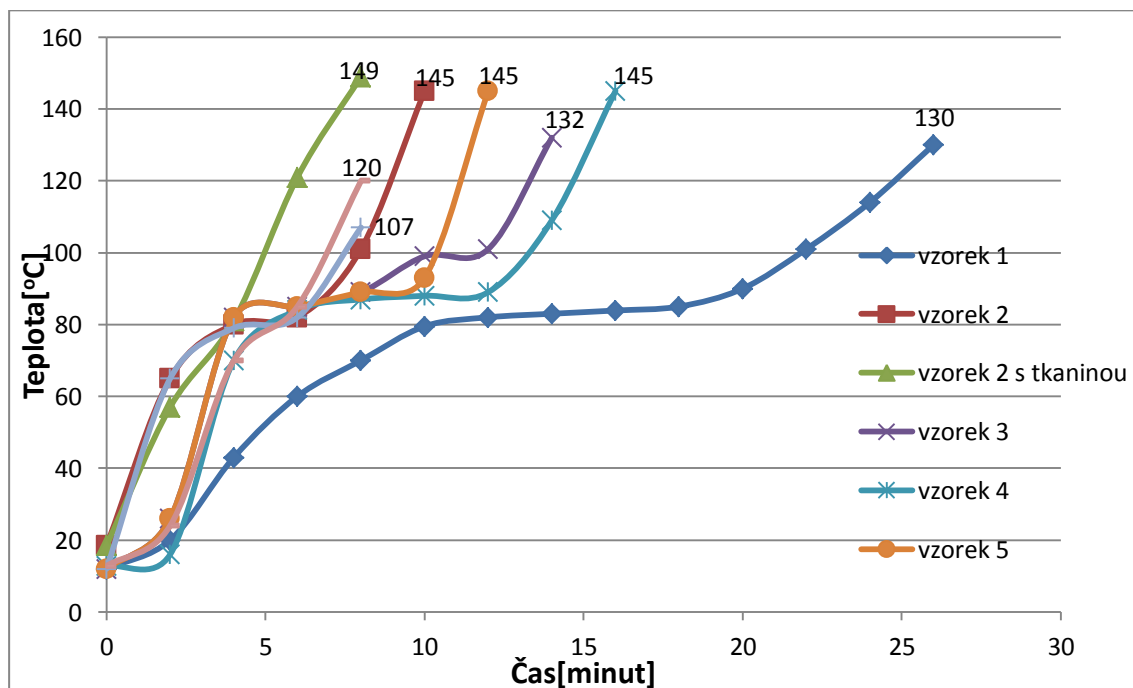
Vyhodnocení: Z pozorování snímků vzorků je vidět, že:

- Na vzorcích, které byly ponechány 28 dní při laboratorní teplotě, je možno zřetelně pozorovat více prasklin, ale nelze určit, které z nich vznikly při zkoušce v tlaku a které při výrobě. Adheze mezi plnivem a geopolymerní maticí nebyla uspokojivá, částicová plniva bylo vytržena z matrice. Bylo zjištěno malé množství mikroporů. Tam, kde se nachází prasklina v matici, jsou ala vlákna neporušena (přemísťují trhliny)
- Na vzorcích vystavených teplotě 850°C po dobu jedné hodiny bylo patrné, že mikrostruktury vzorků jsou odlišné. Na vzorcích 1, 2, 5 a 6 bylo patrné, že odolnost proti vysokým teplotám je velmi špatná. Samostatné částice se oddělily a jejich vzájemná soudržnost vymizí. Vzorky 3 a 4 vykazují opačné chování. Na vzorcích nebyl pozorován vznik prasklin ani jejich rozpad. Tento jev lze vysvětlit působením vysoké teploty kdy na plnivo - sklo, které se roztavilo a tím přispělo k soudržnosti vystupování celkého vzorku. Mikrostruktura vzorku 3 ukázala sklovitý vzhled, zatímco vzorek 4 měl voštinovou strukturu. Vysvětlení výskytu voštinové struktury může být zapříčiněn přítomností popílku. Popílek během výroby vzorku absorbuje víc vody a při vysoké teplotě se voda uvolní čímž vzniká mnohem více mikroporů (viz. Obr. 41). Toto vysvětlení odpovídá rovněž k vzorku 1, kde byl použit jako plnivo popílek. (viz. Obr. 35). Různá pórovitost vzorků má vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti těchto vzorků.

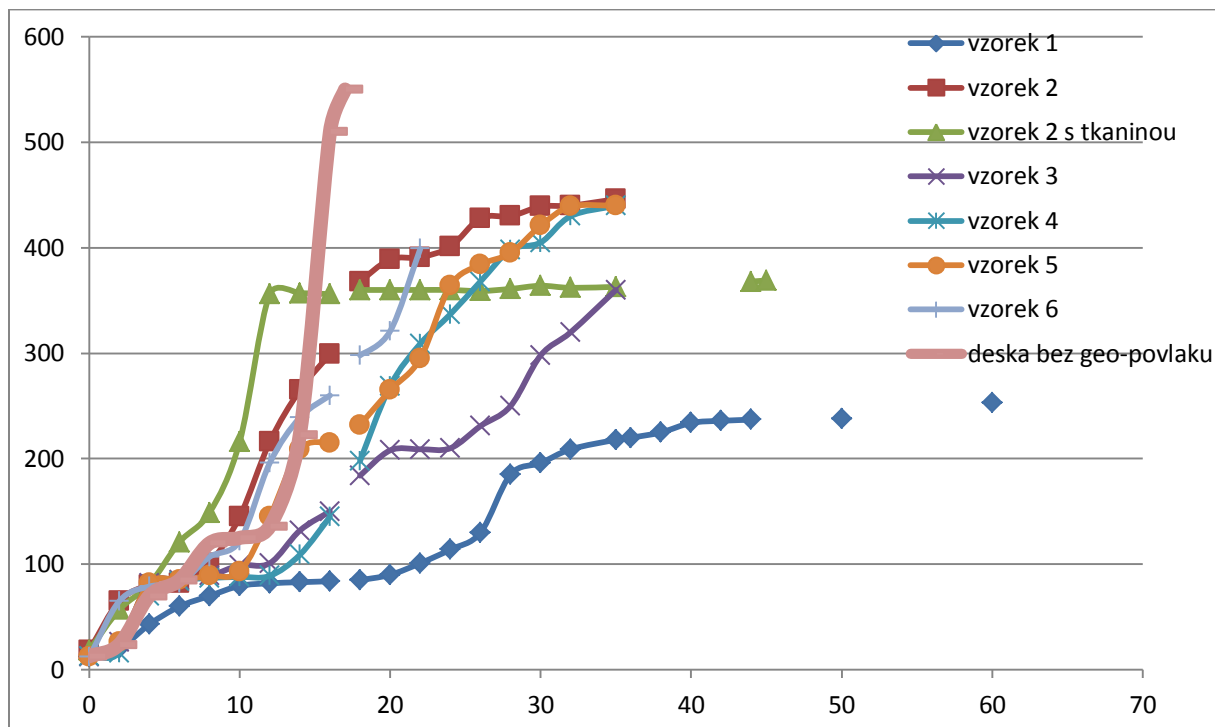
5.6. Výsledky po požární odolnosti na desek OSB



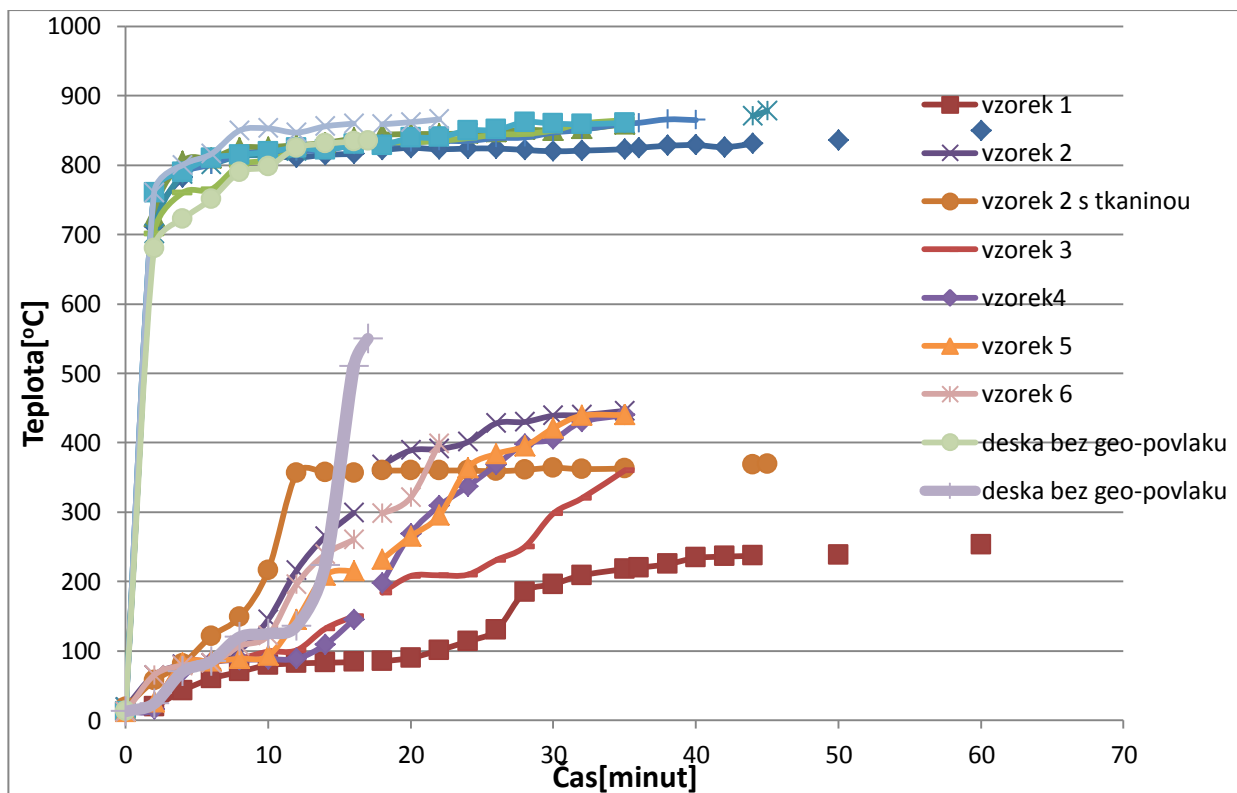
Graf. 5 Průběh teplot – teplota exponované strany OSB desky plamenem



Graf. 6 Průběh teplot neexponované strany OSB desek v době, kdy začínají vznikat černé skvrny



Graf. 7 Průběh teplot – teplota neexponované strany OSB desek



Graf. 8 Celkový pohled o teplotě – teplota ze strany plamene a odvrácené strany OSB desek

Vyhodnocení:

Byly provedeny zkoušky prohoření OSB desky podle odlišné receptury. Chování ohnivzdornosti OSB desek bylo značně odlišné pro každý typ složení geopolyméru a plniva.

Z pozorování grafu 5 je patrné, že na exponovaném povrchu desek dosáhla teplota přibližně po 6 minutách 800°C a pak se dále pomalu zvyšovala až do 860°C až do konce celé zkoušky. Na druhé straně teplota na odvrácené straně OSB desek byla relativně nerovnoměrná.

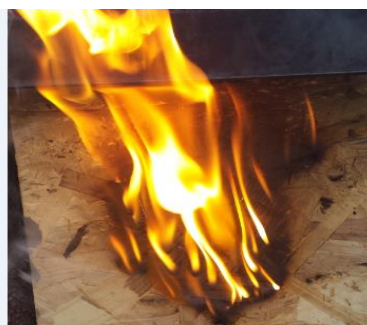
Graf 6 popisuje teplotu v okamžiku, kdy plamen prochází skrz OSB desku, jak je vidět na Obr. 46. Vzorek 1 dosahoval nejlepší výsledek po 26 minutách při teplotě 130°C, zatímco vzorek 2 s tkaninou a vzorek 6 byl zpožděn jen o 8 minut při teplotě 149°C a 107°C.

Z pozorování grafu 8 je patrné:

- Na OSB desce bez geo-povlaku vznikla černá skvrna na neexponované straně při teplotě 120°C za 8 minut. Poté byla zkouška ukončena. Na plamenem neexponované straně při teplotě 550°C vznikla černá skvrna a plamen za 17 minut. Desky s geopolymerním povlakem můžou vydržet teplotu v intervalu od 22 minut do 60 minut.
- Nejvyšší protipožární odolnost byla pozorována na vzorku 6, který obsahuje plniva z odpadu keramiky a čedičových vláken. Plamen prošel skrz odvrácenou stranu OSB desky za 8 min za vzniku kouře. Popálenina rostoucí podle času a v době 22 minut vznikl plamen na odvrácenou stranu, jak je vidět na obr. 20



Chování neexponované strany po 8 minut

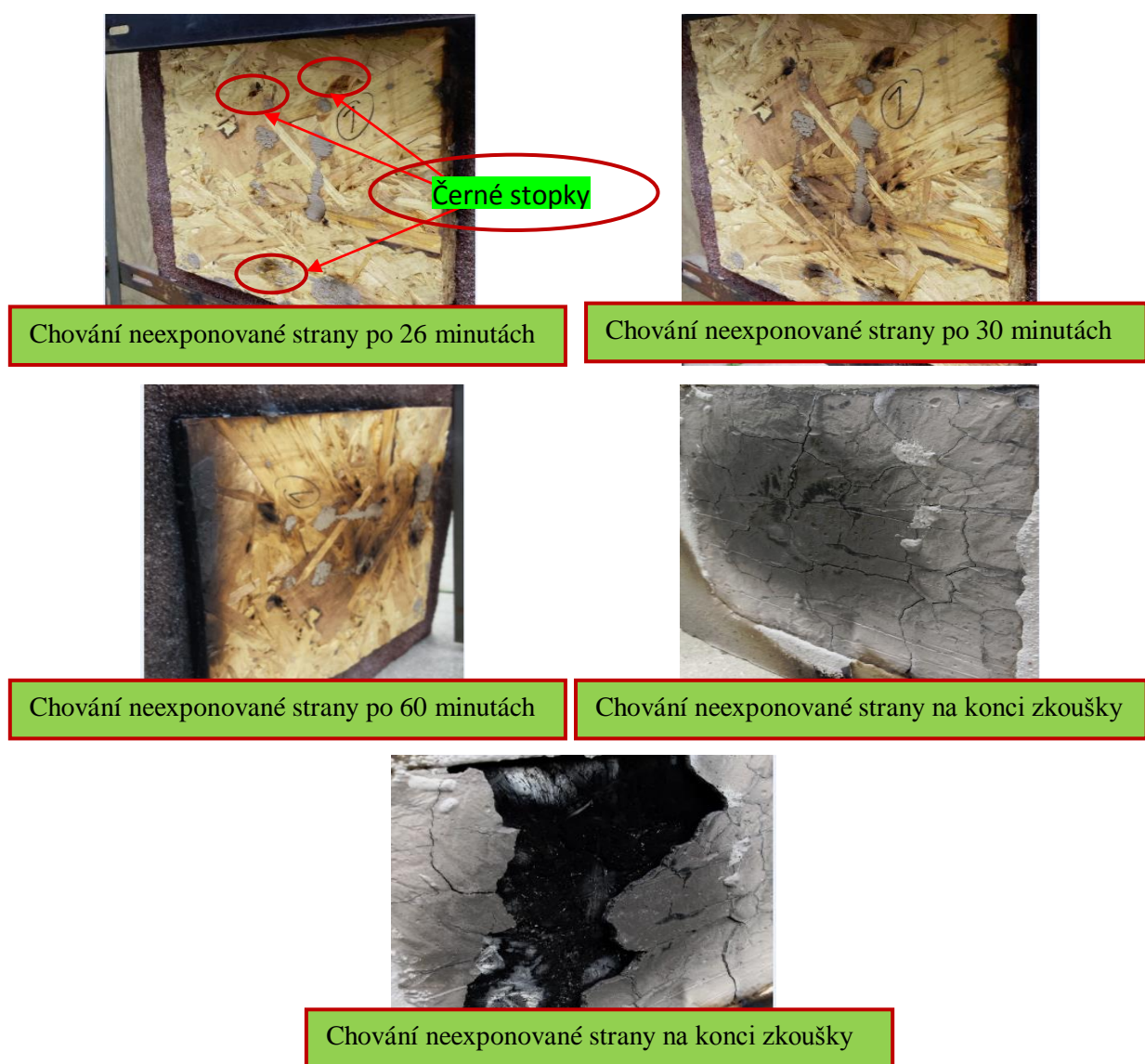


Chování neexponované strany po 22 minut

Obr. 47 Pohled o vzorku 6 během zkoušky

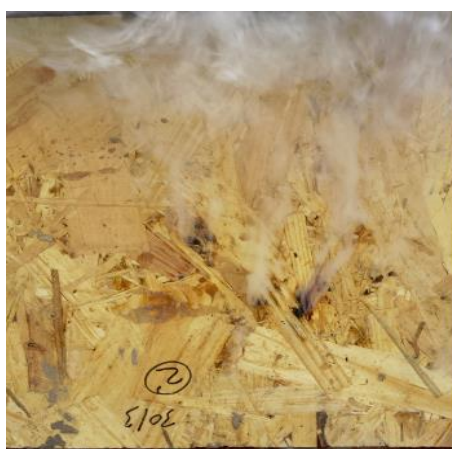
- Vzorek 1, kde bylo použito jako plniva granát, popílek a čedičová vlákna, vykazuje nejlepší protipožární odolnost. Protipožární odolnost vzorku obr. 47. je vidět v grafu 8. Po dobu 26 minut byla neexponovaná strana OSB desky ještě velmi dobrá i když několik

nepatrných čených skvrn se objevilo. Po zhruba 30 minutách začaly černé skvrny tmavnout, ale teplota této strany desky byla jen 196°C (nižší než teplota 200°C, viz. australská norma). Test prohoření vzorku 1 byl prováděn po dobu 60 minut a výsledek ukázal, že na neexponované straně OSB desky nebyl pozorován po celou dobu jedné hodiny plamen a během zkoušky nebylo bylo zpozorováno ani mnoho kouře. Na konci zkoušky (po 60 minutách) byla naměřena teplota pouze 253°C. Po ukončení zkoušky byl geo-povlak byl funkční viz obr. 21d, ale po působení malé síly se ukázalo, že je křehký obr. 21e.



Obr. 48 Chování vzorku 1 během zkoušky

- Složení vzorku 2 je analogické ku vzorku 6, vzorek 2 nebyl plněn čedičovými vlákny. Výsledek zkoušky ukázal, že se během zkoušky uvolnilo více kouře, ale celková protipožární odolnost byla lepší. Po 10ti minutách žárového namáhání byla naměřená teplota černé skvrny na neexponované straně 145°C a po 22ti minutách se černá svrna ještě více rozšířila jak je patrné z obrázku 48. Zkouška vzorku 2 byla zastavena po uplynutí doby 35ti minut z důvodů vzniku velkého prohoření bez vývoje plamene na neexponované straně, na které byla naměřena teplota 446°C. Z výsledků zkoušky je rovněž patrné, že přidání čedičových vláken jako pliniva nemá příznivý vliv na žárovou odolnost.



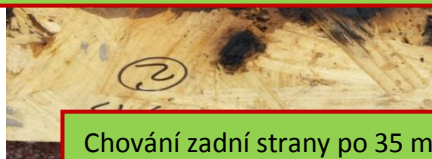
Chování neexponované strany po 12 minutách



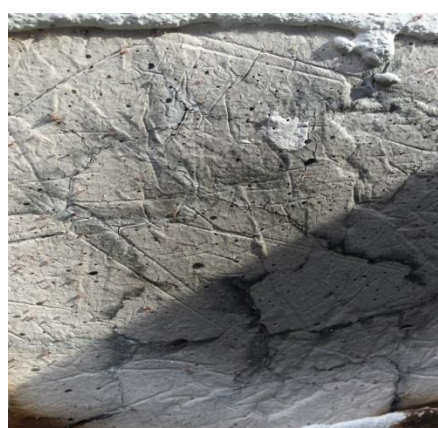
Chování neexponované strany po 22 minutách



Chování neexponované strany po 35 minutách



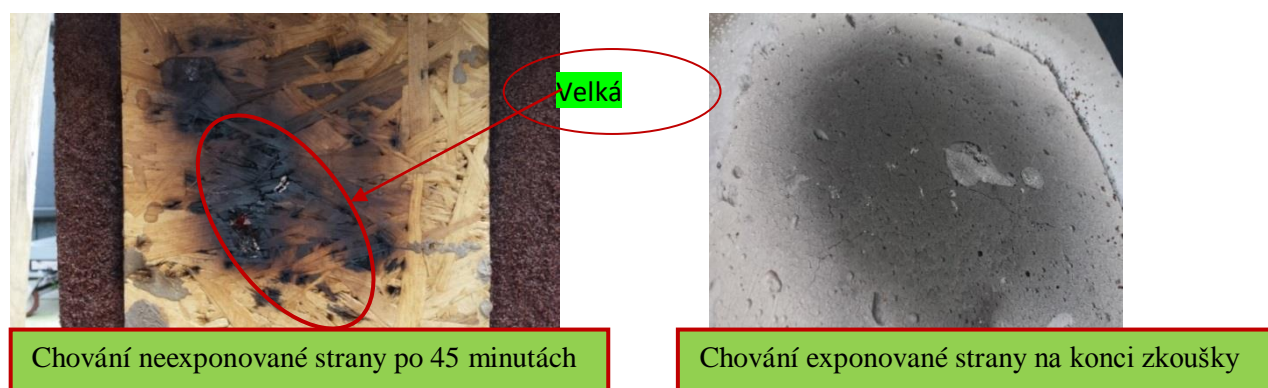
Chování zadní strany po 35 minut



Chování neexponované strany na konci zkoušky

Obr. 49 Chování vzorku 2 během zkoušky

- Použití vzorku 2 ve formě geo-povlaku s podkladovou čedičovou tkaninou prokázalo prodloužení doby odolnosti OSB desky proti prohoření. Během zkoušky se rovněž uvolňovalo větší množství dýmu. Plamen prohořel skrz desku během 8 minut expozice, naměřená teplota na neexponované straně byla 149°C. Je ovšem zajímavé, že použití čedičové tkaniny na vzorku 2 ve formě geo-povlaku poskytuje nižší naměřenou teplotu na neexponované straně desky oproti vzorku 2 bez tkaniny. Naměřená teplota na neexponované straně desky byla v případě vzorku 2 446°C, zatímco teplota neexponované strany vzorku 2 s čedičovou tkaninou byla jen 363°C a po 45ti minutách expozice plamenem byla teplota neexponované strany desky 369°C bez vývoje plamenu. Jak je patrné z obrázku 49, čedičová tkanina významně ovlivňuje žáruvzdornou odolnost.



Obr. 50 Chování vzorku 2 ve formě geo-povlaku s tkaninou

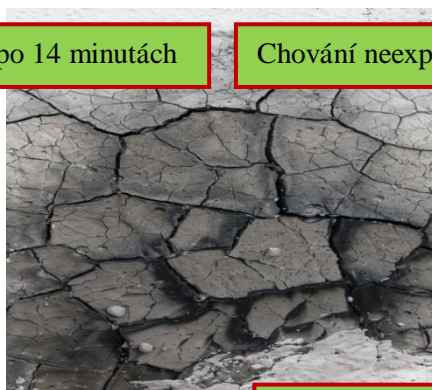
- Chování vzorku 3 a v 4 v průběhu požární zkoušky je podobné a to i v případě přidání skla jako plniva. Doba, po kterou nedošlo k prohoření vzorků desek byla přijatelná. Vzorek 3 vydržel expozici plamenem bez známky poškození po dobu 14 minut přičemž neměřená teplota neexponované strany byla 132°C. Vzorek 4 vydržel expozici plamenem bez známek poškození po dobu 16 minut přičemž naměřená teplota neexponované strany byla 145°C. Nicméně s prvním projevem poškození prohořením se žáruvzdornost vzorků výrazně snížila. Na obrázku 50 je patrné, že neexponovaná strana desky po expozici trvající 14 minut nevykazuje větší poškození. Po uplynutí této doby se poškození šířilo rychleji. Po expozici plamenem po dobu 35ti minut došlo k úplnému shoření vzorku, z tohoto důvodu byla zkouška ukončena. U vzorků se skelným plnivem došlo vlivem tepelné roztažnosti k rozpínání geopolymerního povlaku což zapříčinilo, že

delší doba expozice plamenu způsobila rozšíření trhlin. Rozšíření trhlin poskytuje vysvětlení proč plamen tak snadno prohoří skrze desky.



Chování neexponované strany po 14 minutách

Chování neexponované strany po 35 minutách



Chování exponované strany na konci zkoušky

Obr. 51 Chování vzorku

- Zkouška žáruvzdornosti vzorku 5 trvala po dobu 35 minut. Po uplynutí této doby došlo k značnému prohoření skrz desku vzorku, jak je patrné na obrázku 51. Doba, po kterou ještě nedošlo k poškození neexponované strany vzorku byla 12 minut. Teplota naměřená na neexponované straně vzorku po 12ti minutách expozice 145°C. Po ukončení zkoušky byla teplota na neexponované straně vzorku 440°C. Během zkoušky opět došlo k většímu zakouření.



Chování neexponované strany po 12 minutách



Chování neexponované strany po 16 minutách



Chování neexponované strany po 35 minutách



Chování exponované strany po 35 minutách

Obr. 52 Chování vzorku 5 během zkoušky

V průběhu zkoušky prohoření desky OSB bez geo-povlaku, zkouška se skončila z důvodů vzniku plamenu na straně od plamene, ale desky OSB s geo-povlakem se takto nechovají. Většinou byly zkoušky ukončeny z důvodů velkého porušení na neexponované straně desky (bez plamene).

6. Závěr

Byla provedena rešerže na téma žáruvzdorných materiálů – geopolymérů. Byl navržen experiment s využitím propanbutanového hořáku a konstrukce vzorků. Byl proveden experiment pro stanovení ohnivzdornosti OSB desek s použitím geopolymerního nátěru. Tato geopolymerní vrstva byla složena z různých komponent.

Bylo použito 6 různých druhů plniv – technický granát HS, popílek K6-LF, mleté odpady z keramiky, odpadové sklo, čedičová krátká vlákna a čedičová tkanina. Plniva byla vybrána na základě výsledků z předešlých vědeckých prací.

Cílem diplomové práce bylo studium žárové odolnosti konstrukčních OSB desek s využitím kompozitů na bázi geopolymérů a následně otestovat aplikační schopnost upravených materiálů.

Z dosažených výsledků mechnických vlastností a zkoušky žárové odolnosti vyplývá, že pevnost v tlaku nesouvisí se žáruvzdorností.

Vzorek 2 s použitím čedičové tkaniny jako podkladu pro geopolymerní povlak prokázal lepší žárovou odolnost oproti vzorku 2 bez použití podkladové tkaniny. OSB deska bez podkladové tkaniny byla vystavena plamenu po dobu 35ti minut přičemž teplota na neexponované straně byla 450°C (viz. graf 8). OSB desku s podkladovou čedičovou tkaninou bylo možné exponovat plamenem bez poškození neexponované strany po dobu 45 minut přičemž teplota naměřená na neexponované straně byla 363°C.

Nejlepších výsledků žárové odolnosti dosáhl vzorek 1 s obsahem technického granátu HS, popílku a čedičových vláken jako plniva. Tento vzorek byl vystaven expozici po dobu 60ti minut přičemž teplota naměřená na neexponované straně byla jen 253°C, zatímco teplota exponované strany strany byla 850°C.

Plnivo z mleté odpady keramiky není vhodné pro povlaky vyžadující žárovou odolnost. Nevýhodou keramického odpadu je, že adhezní pevnost i žárová odolnost je dobrá, ale během zkoušky se vyvíjelo veliké množství kouře. Skelné plnivo má za následek, že první projevy změny desky na neexponované straně se projeví po delším čase.

Návrh na pokračování v tématu:

Lze konstatovat, že výsledky této práce jsou základní studií pro další experimenty v této oblasti.

Další experimenty by měly být zaměřeny na:

- Adhezní pevnost geo-povlaku na desce.
- Praskliny na povrchu během vytvoření geo-povlaku na OSB desce. Praskliny povlaku působí snížení žáruvzdornosti desky.

7. Seznam obrázků, tabulek, grafů a rovnic

Obrázky:

- Obr. 1 Struktura geopolyméru sestává z polymerní Si – O – Al řetězec [4]
- Obr. 2 Zjednodušený princip geopolymérace [7]
- Obr. 3 Schéma přehledu geopolymerních kompozitů [8]
- Obr. 4 Meze pevností v tahu vysokoteplotních kompozitů a geopolymerního kompozitu vyztuženého sekaným uhlíkovým vláknem [11]
- Obr. 5 Youngův modul pružnosti vysokoteplotních kompozitů a geopolymerního kompozitu vyztuženého sekaným uhlíkovým vláknem [11]
- Obr. 6 Procentuální srovnání základní pevností vysokoteplotních kompozitů v závislosti na teplotě [6]
- Obr. 7 Teplotní/časová křivka pro normy a pomalou vytápění požáru [17]
- Obr. 8 Protipožární zkouška vzorků dle australské normy [14]
- Obr. 9 A) vzorek před testem: 1) betonový materiál ; 2) geopolymerní materiál B) experimentální způsob při požární zkoušce [15]
- Obr. 10 Protipožární odolnost geopolymerního panelu v souvislosti s křivkou RWS [15]
- Obr. 11 Vzorek po protipožární zkoušce [15]
- Obr. 12 Vliv koncentrace KOH na schopnost protipožární odolnosti geopolyméru. K1= 5 M; K2= 10 M; K3= 15 M (Cheng a Chiu 2003) [16]
- Obr. 13 Vliv obsahu metakaolinu na požární odporu [16]
- Obr. 14 Vliv obsahu křemičitanu na požární odporu [16]
- Obr. 15 OSB deska
- Obr. 16 Pec HT Ceramic – použitá pro teplotní expozici
- Obr. 17 Formy pro přípravu vzorků
- Obr. 18 Postup vytvoření maltu na desek OSB; A) natírání první povlak; B) 1. povlak po 24 hodin; C) Natírání druhý povlak; D) Suchý povlak po týdnem
- Obr. 19 Pohled povrchu vzorků po 28 dnech

- Obr. 20 Přípravné vzorky pro zkoušku adhezní pevností
- Obr. 21 Složky BAUCISU L160: Cement L160 – aktivovaný metakaolin (vlevo), Pojivo L160 – alkalický aktivátor (vpravo).
- Obr. 22 Energetické spektrum EDX aktivovaného metakaolinu – Cement L160.
- Obr. 23 SEM fotografie popílku K6-LF a odpovídající chemické složení
- Obr. 27 čedičová kratká vlákna
- Obr. 28 čedičová tkanina
- Obr. 29 zkouška pro vyhodnocení pevností v tlaku na přístroji P100-Labtest II
- Obr. 30 Příprava a umístění pro proces požární zkoušky
- Obr. 31 zkouška pro vyhodnocení adhezní pevností na přístroji P100-Labtest II
- Obr. 32 Rastrovací elektronový mikroskop Carl ZEISS Ultra+.
- Obr. 33 Pohled zkušební vzorků po tahové zkoušce na přístroji P100-Labtest II
- Obr. 34 Pohled vzorků v peci 850°C po tlakové zkoušce
- Obr. 35 Struktura vzorku 1 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 36 Struktura vzorku 1 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 37 Struktura vzorku 2 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 38 Struktura vzorku 2 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 39 Struktura vzorku 3 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 40 Struktura vzorku 3 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 41 Struktura vzorku 4 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 42 Struktura vzorku 4 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 43 Struktura vzorku 5 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 44 Struktura vzorku 5 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 45 Struktura vzorku 6 po 28 dnech při laboratorní teplotě
- Obr. 46 Struktura vzorku 6 v teplotě 850°C za hodinu
- Obr. 47 Pohled o vzorku 6 během zkoušky
- Obr. 48 Chování vzorku 1 během zkoušky
- Obr. 49 Chování vzorku 2 během zkoušky
- Obr. 50 Chování vzorku 2 ve formě deo-povlaku s tkaninou
- Obr. 51 Chování vzorku 3 během zkoušky

Obr. 52 Chování vzorku 5 během zkoušky

Obr. 53 Vzorek 1 před a po tepelné expozici

Obr. 54 Vzorek 2 před a po tepelné expozici

Obr. 55 Vzorek 3 před a po tepelné expozici

Obr. 56 Vzorek 4 před a po tepelné expozici

Obr. 57 Vzorek 5 před a po tepelné expozici

Obr. 58 Vzorek 6 před a po tepelné expozici

Tabulky:

Tab. 1: Receptury 1-7

Tab. 2 Hlavní vlastnosti krátkých čedičových vláken (3.2mm)

Tab. 3 shrnuté výsledky z adhezní pevností

Tab. 4 shrnuté výsledky z změny objemové hmotnosti

Tab. 5 shrnuté výsledky z nasákavosti

Tab. 6 shrnuté výsledky z tlakové pevností

Graf:

Graf. 1 Křivky teplotního zatěžování

Graf. 2 Změna objemové hmotnosti vzorků po vystavení teplotnímu zatěžování

Graf. 3 Nasákavost odlišné receptury po 28 dnech při laboratorní teplotě

Graf. 4 Porovnání pevnosti v tlaku v závislosti na teplotnímu zatížení odlišného vzorků

Graf. 5 Průběh teplot – teplota exponované strany OSB desky plamenem

Graf. 6 Průběh teplot neexponované strany OSB desek v době, kdy začínají vznikat černé skvrny

Graf. 7 Průběh teplot – teplota neexponované strany OSB desek

Graf. 8 Celkový pohled o teplotě – teplota ze strany plamene a odvrácené strany OSB desek

8. Použitá literatura

- [1] DAVIDOVITS, J. Geopolymer of Chemistry and Properties. Geopolymer '88, Vol.1, pp. 25-48
- [2] TRAN DOAN HUNG – Thermal-mechanical behavior of silica-based geopolymer carbon composite.
- [3] URL:<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Geopolymer>> online [8.4.2015]
- [4] Ing. PHAN THANH NHAN - dizertační práce. Experimentální a analytický výzkum termo-mechanických vlastností kompozitních materiálů tvořených geopolymerní maticí vyztužených tkaninou, TUL, v Liberci 2013.
- [5] TRAN DOAN HUNG - dizertační práce ,Thermal silica-based geopolymer composite system: study of processing and mechanical properties,Technická univerzita v Liberci, 2010
- [6] JASZICEK, M. Hodnocení fyzikálních vlastností kompozitních systémů s geopolymerní maticí. Diplomová práce TUL, 2009.
- [7] DUXSON, P., et al., Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, 2007. 42(9): p. 2917-2933
- [8] LÁNÍK, P. Geopolymerní kompozitní systémy a jejich odolnost k dynamickému namáhání
- [9] Joseph Davidovits. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia
- [10] TRAN DOAN HUNG - New Generation of Geopolymer Composite for Fire-Resistance
- [11] G. PAKONSTANTINO, P. BALAGURU, R.E.LYON. Comparative study of high temperature composites. Composites: Part B 32 (2001) 637-649 – C
- [12] J. Temuujina, A. Minjigmaab, W. Rickarda, M. Leea, I. Williamsa, A. Riessena. Preparation of metakaolin based geopolymer coatings on metal substrates as thermal barriers, Applied Clay Science 46 (2009) 265–270.
- [13] J. Temuujina, A. Minjigmaab, W. Rickarda, M. Leea, I. Williamsa, A. Riessena .Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings, Journal of Non-Crystalline Solids 357 (2011) 1399–1404
- [14] J. Temuujina, A. Minjigmaab, W. Rickarda, M. Leea, I. Williamsa, A. Riessena. Fly ash based geopolymer thin coatings on metal substrates and its thermal evaluation
- [15] K. Sakkas. Fire Resistant K-Based Metakaolin Geopolymer for Passive Fire Protection of Concrete Tunnel Linings, Journal of Hazardous Materials 180 (2010) 748–752
- [16] T.W. Cheng *, J.P. Chiu. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, Minerals Engineering 16 (2003) 205–210.
- [17] <https://law.resource.org/pub/au/ibr/as.1530.4.2005.html>
- [18] Firemní literatura
- [19] <http://www.drevostavitel.cz/clanek/stropni-a-podlahove-osb-desky>

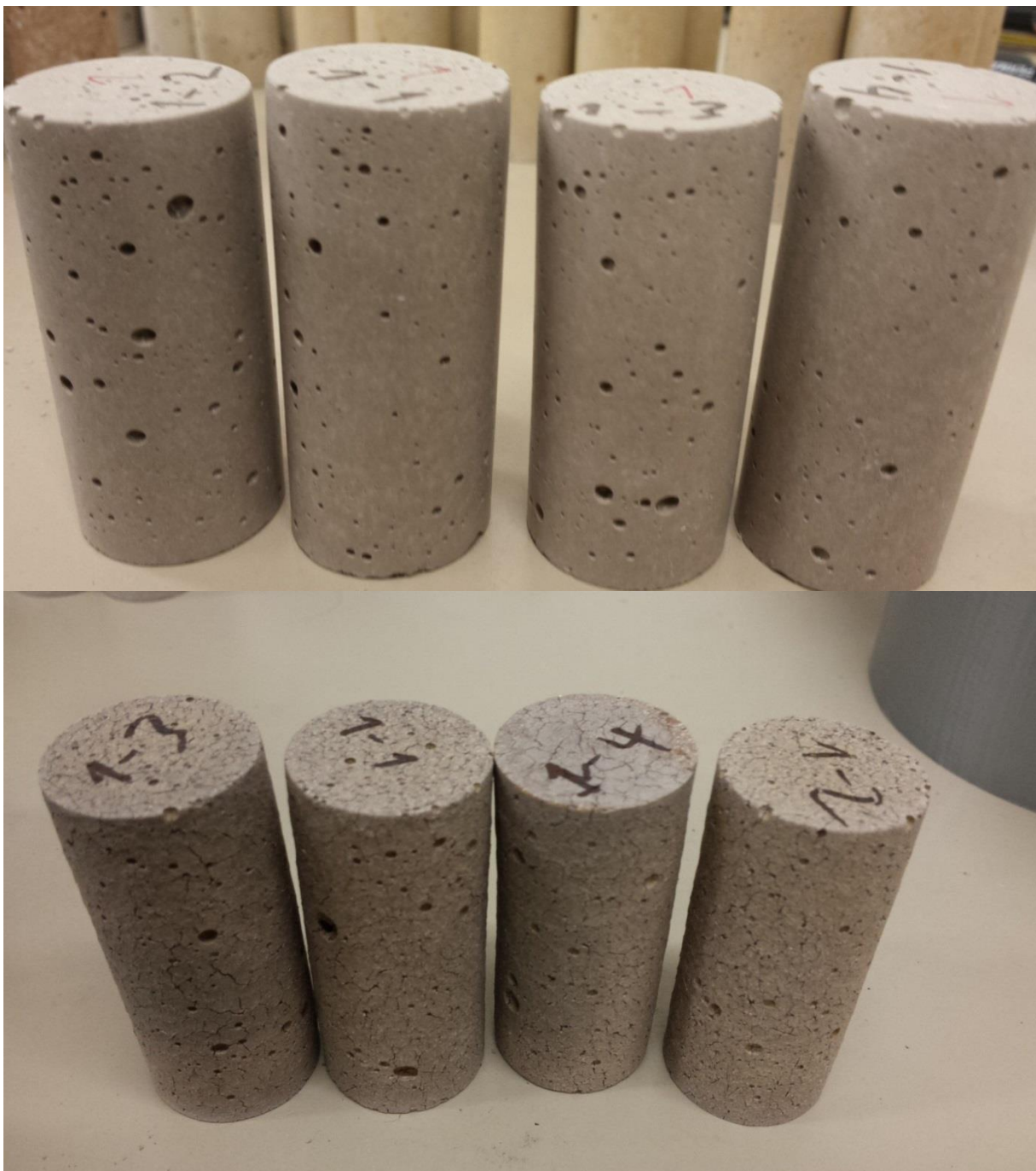
9. Příloha

9.1. Měřené hodnoty z zkoušky v tlaku

Tepelná zátěž	Druh materiálu	Číslo vzorku	Hmotnost [g]	Průměr [mm]	Délka [mm]	Hustota [kg/m ³]	Síla F [N]	Napětí σ [MPa]	Modul E [MPa]	
20°C	Vzorek 1	1	78,25	28,08	62,99	2007,01	19621,3	31,70	1862,87	
		2	72,45	28,08	60,69	1928,67	23302,1	37,65	2013,62	
		3	75,10	28,08	61,95	1958,55	17052,5	27,55	1508,26	
		4	77,49	28,08	63,50	1971,55	16368,8	26,45	
	Průměrné hodnoty			75,82	28,08	62,28	1966,44	19086,2	30,84 ± 4,39	1794,92 ± 211,83
	Vzorek 2	1	69,94	28,08	59,98	1883,89	25243,4	40,78	2859,72	
		2	70,65	28,08	60,99	1871,50	25906,2	41,85	2901,99	
		3	69,98	28,08	60,01	1884,02	21484,8	34,71	2412,04	
		4	69,68	28,08	59,70	1885,69	25140,9	40,62	2830,65	
	Průměrné hodnoty			70,06	28,08	60,17	1881,28	2443,83	39,49 ± 2,8	2751,10 ± 197,39
	Vzorek 3	1	72,99	28,08	61,95	1903,52	18926,6	30,58	2323,16	
		2	75,09	28,08	63,87	1899,42	21576,6	34,86	2623,36	
		3	71,54	28,08	61,08	1892,28	20458,3	33,10	2224,49	
		4	73,30	28,08	61,35	1930,30	14359,9	23,20	1876,10	
	Průměrné hodnoty			73,23	28,08	62,06	1906,38	18837,1	30,43 ± 4,44	2261,78 ± 266,76
	Vzorek 4	1	70,38	28,08	64,37	1766,45	14161,5	22,88	1359,13	
		2	69,06	28,08	63,70	1751,55	13612,4	21,99	2214,22	
		3	69,56	28,08	63,21	1777,91	14575,9	23,55	2221,15	
		4	70,05	28,08	64,33	1759,26	14419,9	23,30	2334,63	
	Průměrné hodnoty			69,76	28,08	63,90	1763,79	14192,4	22,93 ± 0,59	2032,28 ± 391,57
	Vzorek 5	1	79,68	28,08	61,69	2086,75	26734,9	43,19	2576,42	
		2	78,88	28,08	60,81	2095,69	25282,4	40,85	2849,73	
		3	78,45	28,08	61,08	2075,06	32042,1	51,77	3313,08	
		4	78,19	28,08	61,87	2041,77	20846,8	33,68	1732,57	
Průměrné hodnoty			78,80	28,08	61,36	2074,82	26226,6	42,37 ± 6,46	2617,95 ± 575,01	
Vzorek 6	1	71,11	28,08	62,12	1849,42	21151,5	34,17	2120,53		
	2	71,47	28,08	62,95	1834,27	23882,9	38,59	2701,39		
	3	71,05	28,08	63,02	1821,47	25491,4	41,18	2473,01		
	4	70,77	28,08	62,39	1832,61	19121,4	30,89	2198,39		
Průměrné hodnoty			71,10	28,08	62,62	1834,44	22411,8	36,21 ± 3,96	2373,33 ± 230,26	
850°C	Vzorek 1	1	65,59	26,65	59,23	1986,24	3132,86	5,62	395,54	
		2	67,50	26,90	60,73	1956,71	4121,31	7,26	523,45	
		3	65,22	26,86	59,18	1945,92	3108,10	5,49	581,06	
		4	65,09	26,58	59,08	1986,53	3497,81	6,31	809,05	
	Průměrné hodnoty			65,85	26,75	59,56	1968,85	3465,02	6,17 ± 0,7	577,28 ± 149,72
	Vzorek 2	1	64,72	27,67	61,36	1754,95	3741,98	6,23	1119,07	
		2	63,70	27,65	61,59	1723,33	3834,11	6,39	665,68	
		3	62,32	27,59	59,12	1764,09	4383,27	7,34	1099,77	
4		63,51	27,57	60,82	1750,06	3929,75	6,59	873,54		

Průměrné hodnoty		63,56	27,62	60,72	1748,11	3972,28	6,63 ± 0,42	939,52 ± 185,24
Vzorek 3	1	68,03	27,89	62,81	1773,80	10271,3	16,82	1629,70
	2	64,65	27,43	60,10	1821,26	8248,38	13,97	1687,61
	3	66,70	27,89	61,61	1773,00	11862,1	19,43	1849,97
	4	64,65	27,49	60,06	1814,53	10289,1	17,34	1341,91
Průměrné hodnoty		66,01	27,68	61,15	1795,65	10167,7	16,89 ± 1,95	1627,30 ± 183,49
Vzorek 4	1	61,45	26,72	60,16	1822,52	7518,48	13,41	1097,69
	2	61,19	26,86	59,76	1807,96	8957,02	15,82	1118,75
	3	58,87	26,87	57,99	1791,17	12946,2	22,84	1725,23
	4	58,56	26,71	58,63	1783,46	11185,4	19,97	1617,52
Průměrné hodnoty		60,02	26,79	59,14	1801,28	10151,8	18,01 ± 3,64	1389,80 ± 284,24
Vzorek 5	1	70,42	27,24	60,48	1998,94	3115,02	5,35	935,78
	2	68,08	27,19	58,07	2020,13	3362,98	5,79	684,27
	3	71,09	27,35	60,13	2013,41	3100,79	5,28	488,89
	4	68,40	27,34	58,92	1978,46	2958,96	5,04	696,59
Průměrné hodnoty		69,50	27,28	59,40	2002,74	3134,44	5,37 ± 0,27	701,38 ± 158,44
Vzorek 6	1	61,56	27,33	60,83	1725,96	3809,34	6,50	476,85
	2	60,45	27,40	59,92	1711,80	4060,92	6,89	600,82
	3	59,82	27,35	59,87	1701,58	4588,82	7,81	511,25
	4	61,64	27,41	61,30	1704,96	3681,83	6,24	608,32
Průměrné hodnoty		60,87	27,37	60,48	1711,08	4035,23	6,86 ± 0,6	549,31 ± 56,64

9.2. Přehled vzorků při laboratorní teplotě po 28 dnech a po tepelném zatížení



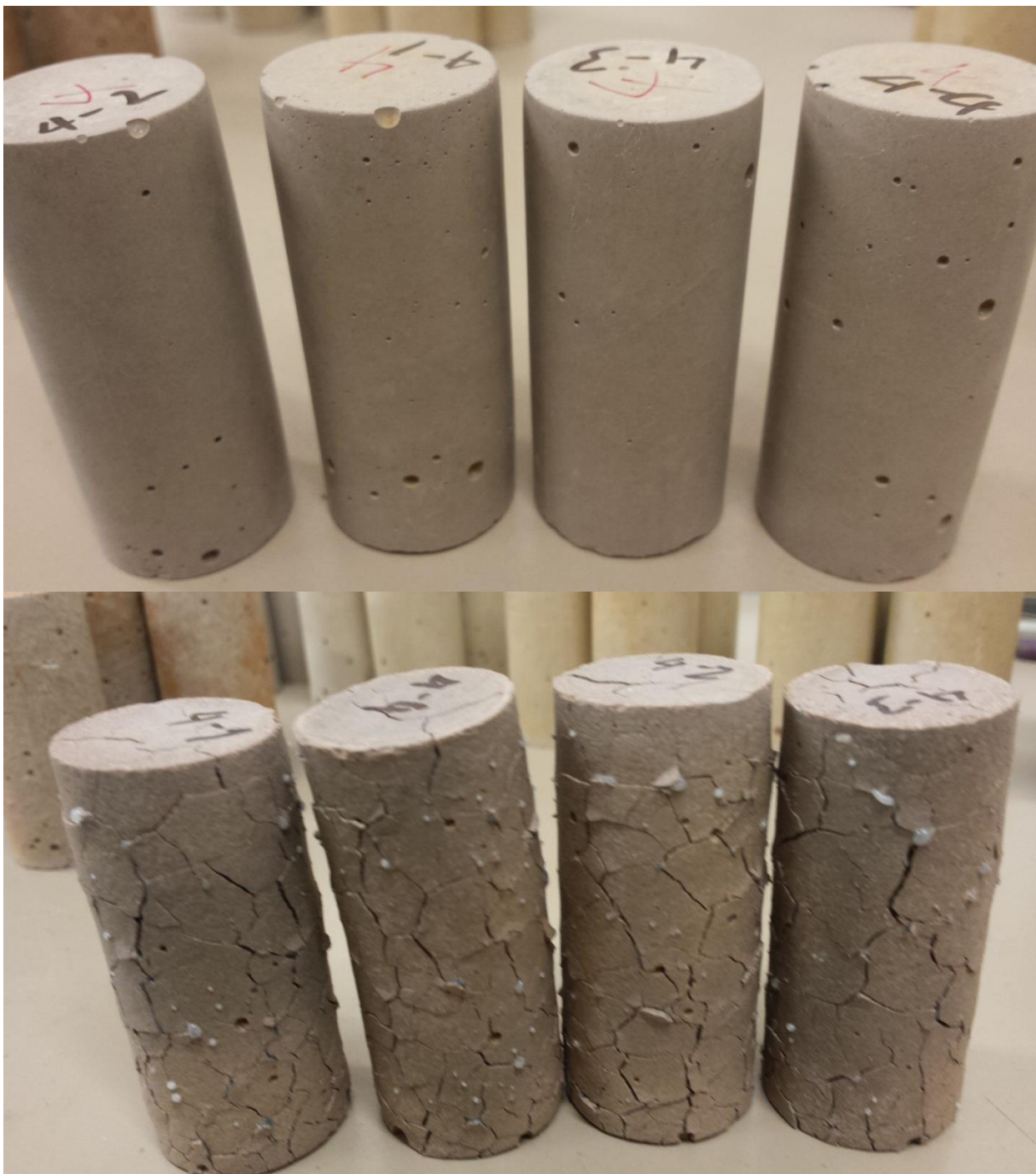
Obr. 53 Vzorek 1 před a po tepelné expozici



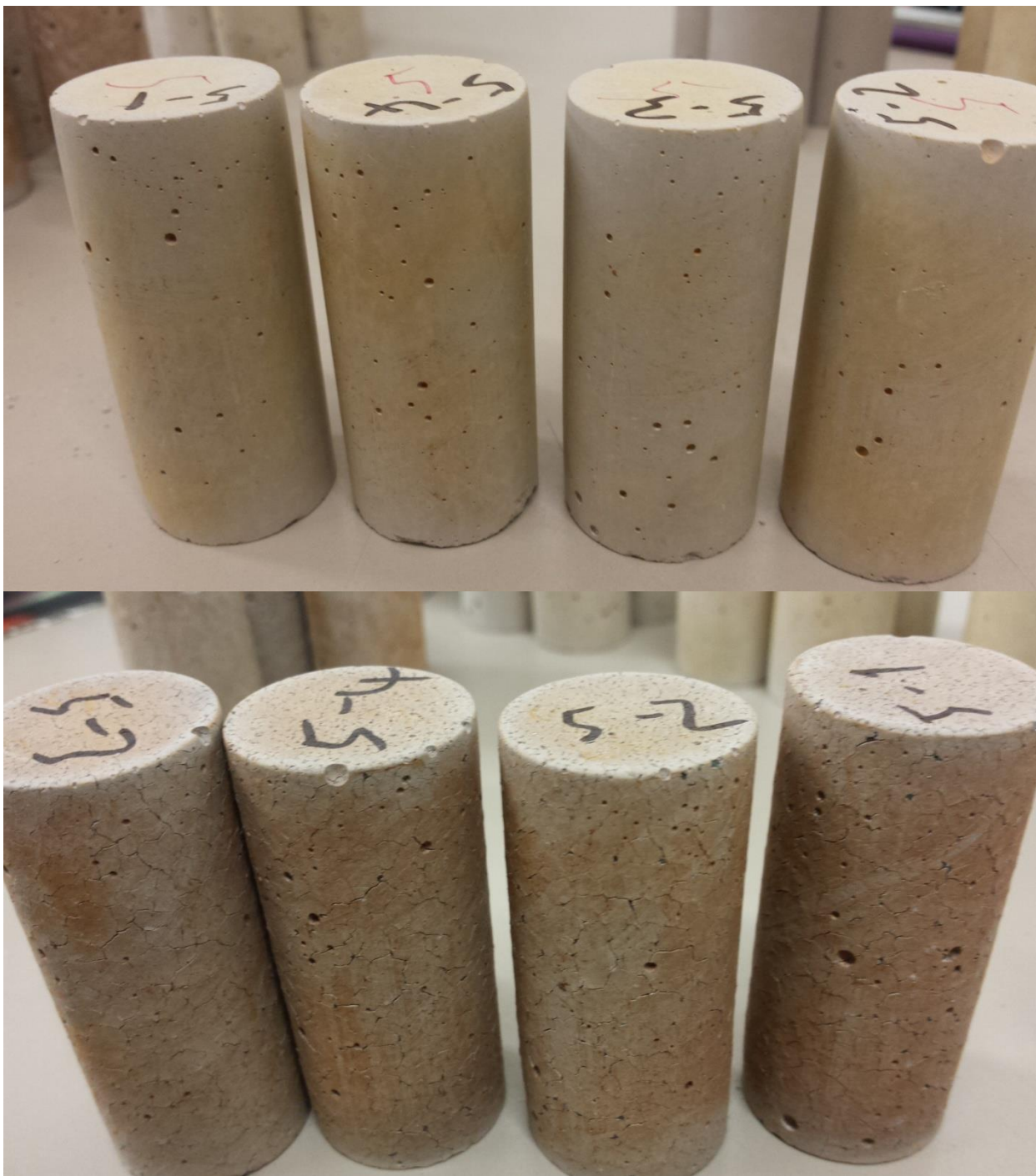
Obr. 54 Vzorek 2 před a po tepelné expozici



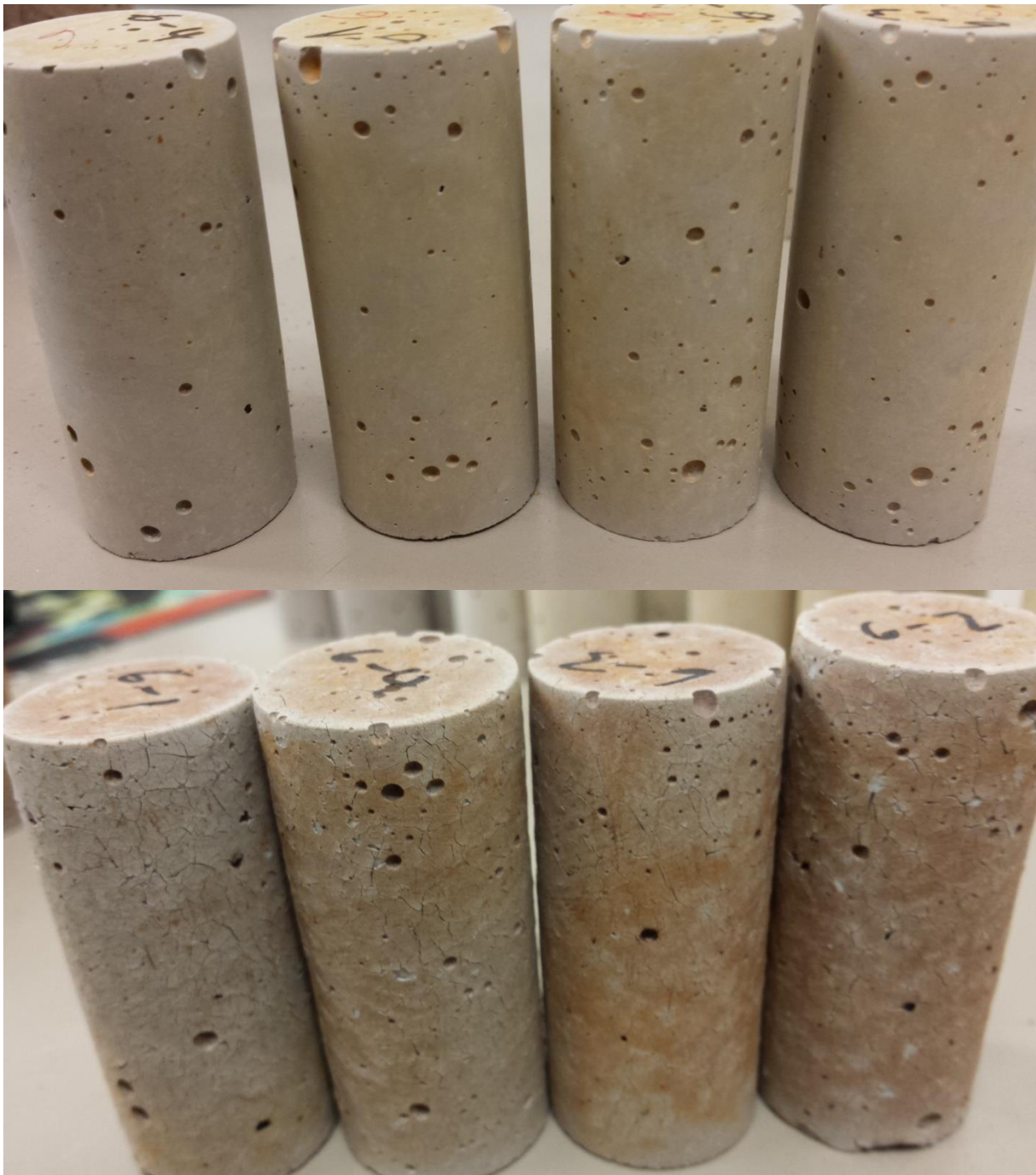
Obr. 55 Vzorek 3 před a po tepelné expozici



Obr. 56 Vzorek 4 před a po tepelné expozici



Obr. 57 Vzorek 5 před a po tepelné expozici



Obr. 58 Vzorek 6 před a po tepelné expozici