

# Transformace nebezpečného azbestocementového odpadu na bezpečné funkční produkty

Theodor STANĚK<sup>a</sup>, Martin NGUYEN<sup>a</sup>, Michaela KREJČÍ KOTLÁNOVÁ<sup>a</sup>, Jiří HOLUB<sup>b</sup>, Zdeněk KREJZA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., e-mail: [staneke@vush.cz](mailto:staneke@vush.cz)

<sup>b</sup>LB Cemix, s.r.o.

## Souhrn

Azbestocementové materiály patří mezi nejrozšířenější formy nebezpečného odpadu s obsahem azbestu. Jejich likvidace se obvykle provádí formou skládkování. V současné cirkulární ekonomice však mohou s výhodou sloužit jako surovina pro výrobu stavebních materiálů. Jejich výpalem v šachtové peci bez předchozí úpravy a pomletím po tepelné inertizaci je možné získat hydraulické pojivo. Pojivo je navíc karbonatovatelné a lze jej použít k výrobě prefabrikátů v CO<sub>2</sub> komorách. Tím by vzniklý produkt mohl přispět k velmi aktuálnímu cíli současnosti, kterým je snižování emisí skleníkových plynů. V prvním případě je možné získat hydraulické pojivo typu silně hydraulické vápno s pevností v tlaku po 28 dnech nad 5 MPa. S využitím zrychlené karbonatace se pevnost v tlaku po 2 dnech zvýší 6krát. Při výzkumu byly použity metody rentgenové fluorescenční analýzy, rentgenové difrakce, optické a elektronové mikroskopie a technologické zkoušky podle norem řady EN 196.

**Klíčová slova:** Nebezpečný odpad, azbestocement, hydraulické vápno, karbonatovatelné pojivo.

## Úvod

Azbestové minerály, které patří do skupiny silikátů, se přirozeně vyskytují ve dvou hlavních formách: chryzotil a amfibol (krokydolit, amosit, tremolit, aktinolit)<sup>1,2,3</sup>. Klíčovou charakteristikou všech azbestových minerálů je jejich vláknitá struktura s délkou, která výrazně přesahuje jejich průřez. Materiály obsahující azbest jsou definovány jako materiály s obsahem azbestu přesahujícím 0,1 hm. %<sup>2,4</sup>. Přestože je azbest klasifikován jako karcinogenní a mutagenní nebezpečná látka, byl v minulosti široce využíván díky svým výjimečným vlastnostem, včetně nehořlavosti, odolnosti vůči kyselinám a zásadám, pevnosti a ohebnosti. Významnou kategorií představují zejména azbestocementové výrobky, které se hojně používaly ve stavebnictví. V důsledku toho v existujících budovách zůstává značné množství azbestu, což vyžaduje nákladné ukládání na specializovaných skládkách<sup>2,3,4</sup>. Tyto skládky představují potenciální rizika pro budoucí generace a zdůrazňují potřebu praktických a bezpečných metod likvidace nebo v ideálním případě přepracování azbestu na materiály vhodné pro alternativní aplikace<sup>5,6,7</sup>. Chryzotil lze dehydroxylovat tepelným ošetřením při teplotách mezi 650 – 750 °C za vzniku forsteritu, a následně enstatitu. Krokydolit se rozkládá na enstatit, hematit a cristobalit při 1050 – 1100 °C. Tremolit se rozkládá při 1050 °C za vzniku diopsidu, enstatitu a cristobalitu. Amosit se transformuje na spinel, hematit, pyroxen a amorfní SiO<sub>2</sub> v teplotním rozmezí od 800 do 1100 °C<sup>8</sup>.

Viani a kol.<sup>9</sup> zkoumali tepelný rozklad různých azbestových odpadů. Zvolili teplotu 1200 °C a dobu žhání 15 a 30 minut. Jejich výsledky poskytují základ pro optimalizaci recyklačních procesů těchto materiálů a optimalizaci inertizačních procesů v průmyslovém měřítku<sup>9</sup>. Tepelným zpracováním se azbestocementové materiály mohou transformovat na hydraulické belitické pojivo vhodné pro použití ve stavebnictví<sup>10</sup>.

Současné technologie zpracování azbestového odpadu se dělí do pěti kategorií: termické, termochemické, chemické, fyzikálně-chemické a mechanochemické<sup>11</sup>. Termická metoda, používaná v omezeném a pilotním měřítku v Nizozemsku, se používá k výrobě keramiky a umělého kameniva. Chemická metoda, rovněž v pilotní fázi, se používá především ve Francii k výrobě siliky a hořčíku.

Nevýhodou jsou silně korozivní podmínky při využívání velmi agresivních chemikálií. Termochemická metoda spočívá v přidavku tavidel pro snížení teploty při přepracování odpadu s obsahem azbestu na inertní umělé kamenivo, a uplatňuje se zejména v Austrálii a USA. Mechanochemické zpracování vyžaduje důkladnou filtraci vznikajícího prachu, případně se provádí v kapalném médiu. V Nizozemsku a USA tento přístup poskytuje hydrát křemičitanu vápenatého, který lze použít do cementu, barev a katalyzátorů. Fyzikálně-chemická technologie zahrnuje metodu MID-MIX, která zpracovává azbestový prach a kal s přidavkem páleného vápna za účelem výroby plniva do betonu nebo asfaltu (používá se v Chorvatsku a Nizozemsku). Pro všechna tato řešení byly většinou navrženy speciální technologické linky a procesy. Naproti tomu náš navrhovaný přístup využívá stávající technologii k recyklaci azbestocementového odpadu a vzniká funkční hydraulické nebo karbonovatelné pojivo, aktivní a udržitelný stavební materiál.

Jednou z potenciálních metod neutralizace nebezpečného odpadu s obsahem azbestu je i zrychlená karbonatace, která představuje slibné řešení pro zpracování tohoto odpadu<sup>6</sup>. Metoda může úspěšně přeměnit nebezpečná azbestová vlákna na stabilní uhličitany a účinně neutralizovat jejich škodlivé vlastnosti<sup>5,6,12</sup>. Zrychlená karbonatace předem upravených azbestocementových kompozitů nabízí jak environmentální, tak ekonomické výhody. Neutralizuje nebezpečná vlákna a zároveň trvale váže CO<sub>2</sub>, čímž přispívá ke zmírňování změny klimatu. Uvedený proces je v souladu s principy cirkulární ekonomiky, protože transformuje nebezpečný odpad na bezpečné, opakovaně použitelné materiály pro stavební aplikace, čímž snižuje skládkování a potřebu přírodních surovin. Karbonatace navíc může zvýšit trvanlivost materiálu, což z ní činí udržitelné a praktické řešení pro nakládání s azbestovým odpadem<sup>12,13,14</sup>.

Cílem příspěvku je poukázat na možnost využití nebezpečného odpadu, azbestocementových výrobků, jejichž vhodné složení umožňuje po tepelné degradaci azbestu získat plnohodnotné hydraulické pojivo. Získané pojivo dosahuje parametrů hydraulického vápna a jeho mechanické vlastnosti lze dále výrazně zvýšit zrychlenou karbonatací, která současně přispívá k vázání CO<sub>2</sub> a snižování uhlíkové stopy.

## **Experimentální část**

Pro experimenty byl použit vzorek eternitových šablon o hmotnosti cca 30 kg uložený v plastovém obalu. Jednalo se o tmavě šedé neztvrdlé šablony s typickým rozměrem 40 x 40 cm a jejich zlomky. Na reprezentativním vzorku byla provedena chemická analýza pomocí rentgenové fluorescence (XRF) za použití spektrometru Bruker S8 TIGER a fázová analýza pomocí rentgenové difrakce (XRD) s vnitřním standardem (20 hm. % CaF<sub>2</sub>) na aparatuře Bruker D8 Advance. Měření XRD bylo provedeno s Co anodou v rozsahu 5-100° úhlu 2θ s krokem 0,02° a variabilními divergenčními clonami při reflexní Bragg-Brentano parafokusní geometrii. Pro identifikaci azbestových fází byl vzorek částečně rozpuštěn v 35% HCl a inertní složky byly analyzovány pomocí XRD.

Celý vzorek nebezpečného odpadu, včetně plastového obalu, byl vypálen v peci LAC PK 105/12 o objemu 105 litrů. Výpal probíhal při teplotě 1100 °C s dobou náběhu 12 hodin a dobou výdrže 3 hodiny. Chlazení na 30 °C probíhalo v peci. Výpal simuloval tepelné podmínky šachtové vápenické pece.

Po vypálení byly šablony rozdrčeny v laboratorním čelistovém drtiči a drť pomleta v laboratorním kulovém mlýnu. Rozemletý vzorek byl znovu analyzován pomocí XRD za účelem stanovení jeho výsledného fázového složení. Připravené na povrchu leštěné nábrusy vypáleného vzorku byly leptány parami kyseliny octové a zkoumány v odraženém světle optického mikroskopu Nikon Eclipse LV100. Dále byla pro sledování mikrostruktury využita také skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s energiově disperzním analyzátozem (EDS) OXFORD X-Max 80 mm<sup>2</sup>. Vzorky byly pokoveny zlatem a analýzy byly provedeny při urychlovacím napětí 15 kV a proudu 4,5 nA. Vzorky po hydrataci nebo karbonataci byly analyzovány na lomové ploše, která byla přilepena k nosiči uhlíkovou páskou a pokovena zlatem. Odstranění zbytkové vlhkosti bylo provedeno vakuováním v měřicí cele.

Distribuce velikostí částic mletého vypáleného vzorku byla stanovena pomocí laserového granulometru Cilas 920 v prostředí isopropylalkoholu. Doba tuhnutí připraveného pojiva byla stanovena

podle normy ČSN EN 196-3, přičemž jako regulátor tuhnutí byla použita kyselina vinná. Trámečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm byly připraveny se 3 normovými písky v souladu s normou ČSN EN 196-1 (3 díly písků a 1 díl pojiva, vodní součinitel 0,5) a jejich pevnost v tahu za ohybu a v tlaku byla stanovena po 7 a 28 dnech hydratace, což jsou obvyklé termíny pro posuzování kvality hydraulického vápna podle ČSN EN 459-1. Trámečky byly uloženy ve vlhkém uložení při teplotě 20 °C ± 1 °C a relativní vlhkosti minimálně 90 %.

Vypálený a rozemletý vzorek azbestocementu byl dále testován jako karbonatovatelné pojivo. Urychlená karbonatace probíhala v CO<sub>2</sub> komoře Memmert ICO 150 při koncentraci CO<sub>2</sub> 20 %, teplotě 30 °C a relativní vlhkosti 75 % po dobu 2 a 7 dnů. Následně byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku těchto karbonatovaných vzorků. Pro testování karbonatace byly připraveny trámečky o rozměrech 20 × 20 × 100 mm jak z pojivové pasty, tak i z malty se 3 normovými písky v poměrech specifikovaných normou ČSN EN 196-1. Pro každý sledovaný termín byly připraveny 3 trámečky a stanoveny 3 hodnoty pevností v tahu za ohybu a 6 pevností v tlaku. Výsledky byly následně zprůměrovány a vypočtena směrodatná odchylka. Stupeň karbonatace byl orientačně sledován pomocí fenolftaleinového testu<sup>15</sup>. Trámeček na lomu byl postříkán roztokem fenolftaleinu. Pokles pH z vysoce zásaditého na téměř neutrální v důsledku karbonatace je doprovázen změnou barvy z tmavě fialové na bezbarvou, což umožňuje odlišit karbonatovanou vrstvu od nekarbonatovaného pojiva.

## Výsledky a diskuse

Analýza vzorku rozpuštěného v HCl ukázala, že chryzotil je jediným azbestovým minerálem přítomným v materiálu. Inertní frakce se dále skládala z křemene a lizarditu, přičemž druhý jmenovaný je strukturálně analogický chryzotilu. Naproti tomu vypálený vzorek rozpuštěný v HCl tvořila výhradně rentgen amorfni hmota.

Chemické složení vzorku azbestocementového odpadu (ACW) před výpalem je uvedeno v tabulce 1. Výsledek ukazuje, že složení tohoto materiálu se velmi podobá složení hydraulických malt. Proto byly z výsledků chemické analýzy vypočítány i cementářské základní chemické parametry podle Taylora<sup>16</sup>. Lze tedy předpokládat, že procesem výpalu dochází k degradaci nebezpečných azbestových vláken za vzniku hydraulického pojiva. Kvantitativní fázová analýza pomocí metody XRD s vnitřním standardem ukázala, že materiál před výpalem obsahoval přibližně 25 hm. % fází portlandského slínku. Po výpalu se tento podíl zvýšil na přibližně 69 hm. % s převahou belitu (viz tabulka 2). Výsledná mikrostruktura je znázorněna na obrázcích 1 a 2.

**Tabulka 1: Chemické složení azbestocementového odpadu ACW a vypočtené základní chemické parametry.**

Složka	Z. ž.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
Obsah hm. %	18,33	18,14	4,42	2,78	46,80	6,66	1,69	0,07	0,08	0,47	0,23	0,06
Parametr	SLP	Ms	Ma	HM								
Hodnota	80,9	2,52	1,59	1,85								

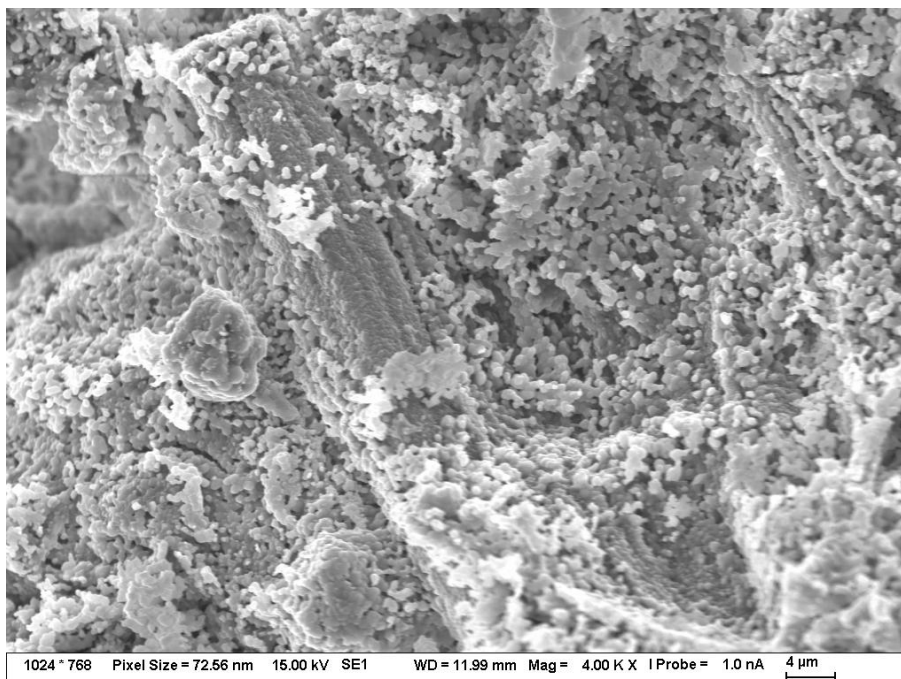
Kde:

$$\text{Sycení vápnem} - \text{SLP} = 100 \cdot \text{CaO} / (2,8 \cdot \text{SiO}_2 + 1,18 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (1)$$

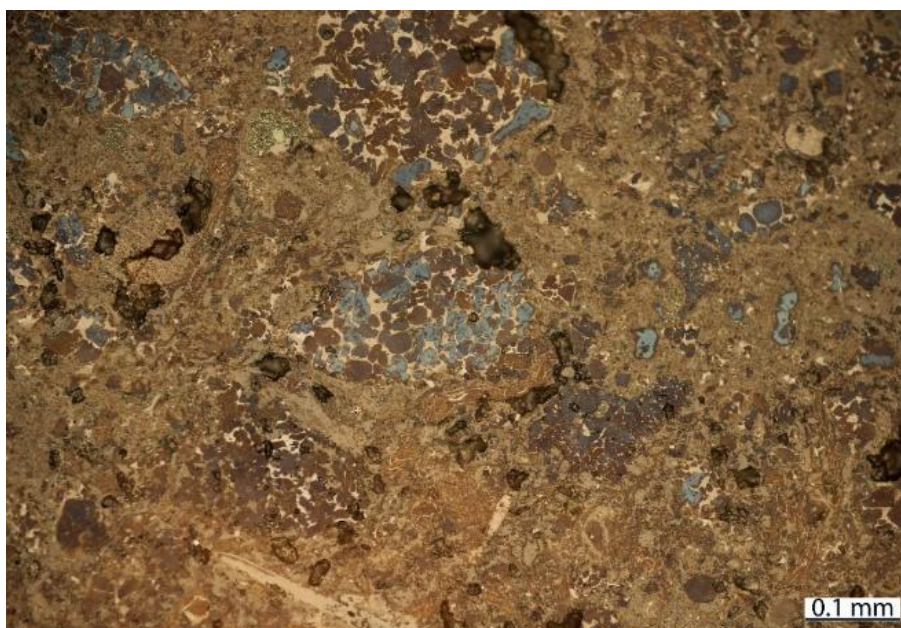
$$\text{Silikátový modul} - \text{Ms} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (2)$$

$$\text{Aluminátový modul} - \text{Ma} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (3)$$

$$\text{Hydraulický modul} - \text{HM} = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (4)$$



**Obrázek 1: Mikrostruktura vzorku ACW po výpalu: Uprostřed vzorku je patrný transformovaný svazek chryzotilu. Snímek pořízený pomocí SEM v režimu sekundárních elektronů.**



**Obrázek 2: Mikrostruktura vzorku ACW po výpalu: Jsou patrné zbytky úlomků portlandského slínku. Modré krystaly – alit, hnědá zrna – belit, světlá výplň mezi krystaly a zrna – slínková mezerní hmota ( $C_3A$  a  $C_4AF$ ). Jemnozrná hnědá oblast – sekundárně vytvořený belit. Odražené světlo, nábrus obarvený parami kyseliny octové.**

**Tabulka 2: Kvantitativní fázové složení azbestocementového odpadu ACW v hm. % před a po výpalu stanovené rentgenovou difrakcí.**

Fáze	Vzorec	Před výpalem	Po výpalu
$\beta$ -C <sub>2</sub> S	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	8,6	53,0
$\gamma$ -C <sub>2</sub> S	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3,4	1,6
C <sub>3</sub> S	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	6,0	3,7
C <sub>4</sub> AF	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,0	8,0
C <sub>3</sub> A	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1,6	1,4
Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>	3,2	1,3
Kalcit	CaCO <sub>3</sub>	11,2	0,0
Ettringit	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> ·26H <sub>2</sub> O	0,1	0,0
Sádrovec	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1,1	0,0
Chryzotil	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2,5	0,0
Křemen	SiO <sub>2</sub>	0,4	0,0
Diopsid	MgCaSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,0	1,3
Enstatit	Mg <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,0	3,8
Forsterit	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	0,0	0,7
Periklas	MgO	0,0	5,0
Spinel	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,0	0,6
Anortit	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	0,0	4,0
Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,5	0,0
Yeelimt	Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> O <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> )	0,0	1,5
Ternesit	Ca <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )	0,0	4,1
Gehlenit	Ca <sub>2</sub> Al(SiAl)O <sub>7</sub>	0,0	3,9
Merwinit	Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0,0	1,5
Amorf	–	59,4	4,6

Vzorek po mletí vykazoval průměrnou velikost částic stanovenou laserovou granulometrií 18,5  $\mu$ m. Výsledné pojivo bez přídavku regulátoru tuhnutí velmi rychle tuhlo, což ho činilo nezpracovatelným. Pokusy prodloužit dobu tuhnutí pomocí sádrovce, jak je běžné u průmyslového cementu, se ukázaly jako neúčinné. Proto byla jako regulátor tuhnutí použita kyselina vinná v dávce 0,5 hm. %. Pevnosti v tlaku připravených normových trámečků, uvedené v tabulce 3, odpovídají klasifikaci hydraulického vápna HL 5 podle normy ČSN EN 459-1.

Potenciál tepelně upraveného azbestocementového odpadu jako alternativního pojiva vzhledem k vysokému podílu belitu popisuje i Carneiro a kol.<sup>17</sup> Navrhují však teplotu zpracování pouze 800 °C, která je dostatečná k přeměně chryzotilu na forsterit nebo enstatit, ale nové fáze mohou stále zůstat ve formě respirabilních vláken, jejichž zdravotní riziko není známo. Uvedený problém je také řešen ve studii japonských autorů<sup>18</sup>.

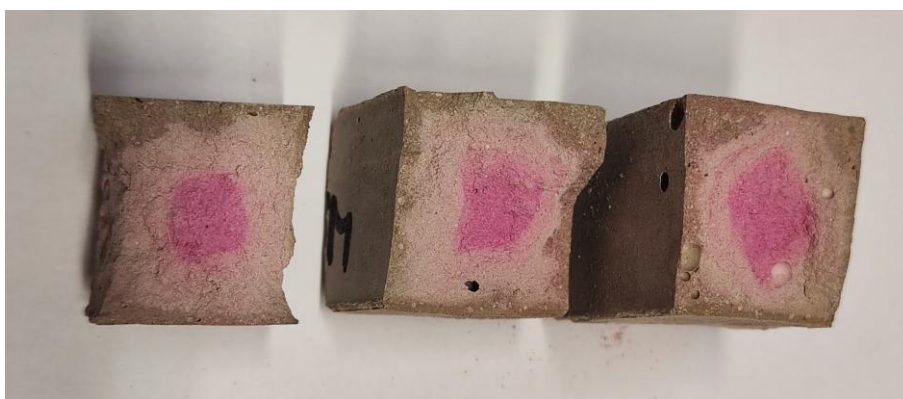
Tabulka 4 uvádí výsledky pevností v tlaku dvou typů trámečků vyrobených z tohoto pojiva (pasta a malta), karbonatovaných v CO<sub>2</sub> komoře. Zatímco pevnosti po hydrataci byly stanoveny ve standardních termínech 7 a 28 dní, pro karbonataci byly zvoleny termíny 2 a 7 dní, protože tento proces probíhá výrazně rychleji a podstatná část pevnostního nárůstu nastává již během prvních dnů. Hloubka karbonatace po 2 dnech je patrná na obrázku 3 a 4.

**Tabulka 3: Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu pojiva v MPa podle ČSN EN 196-1, objemová hmotnost vzorků v kg/m<sup>3</sup>.**

Vzorek	7 dní			28 dní		
	ohyb	tlak	obj. hmotnost	ohyb	tlak	obj. hmotnost
Malta ACW 1100	1,4±0,1	2,6±0,3	2185±31	1,8±0,3	5,1±0,4	2142±28

**Tabulka 4: Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu pojiva v MPa po karbonataci v CO<sub>2</sub> komoře, objemová hmotnost vzorků v kg/m<sup>3</sup>.**

Vzorek	2 dny			7 dní		
	ohyb	tlak	obj. hmotnost	ohyb	tlak	obj. hmotnost
Pasta ACW 1100	2,6±0,7	10,4±1,9	1700±10	9,6±0,9	36,0±4,4	1877±15
Malta ACW 1100	6,9±0,7	33,5±4,3	2110±53	9,6±0,6	43,4±3,5	2117±23



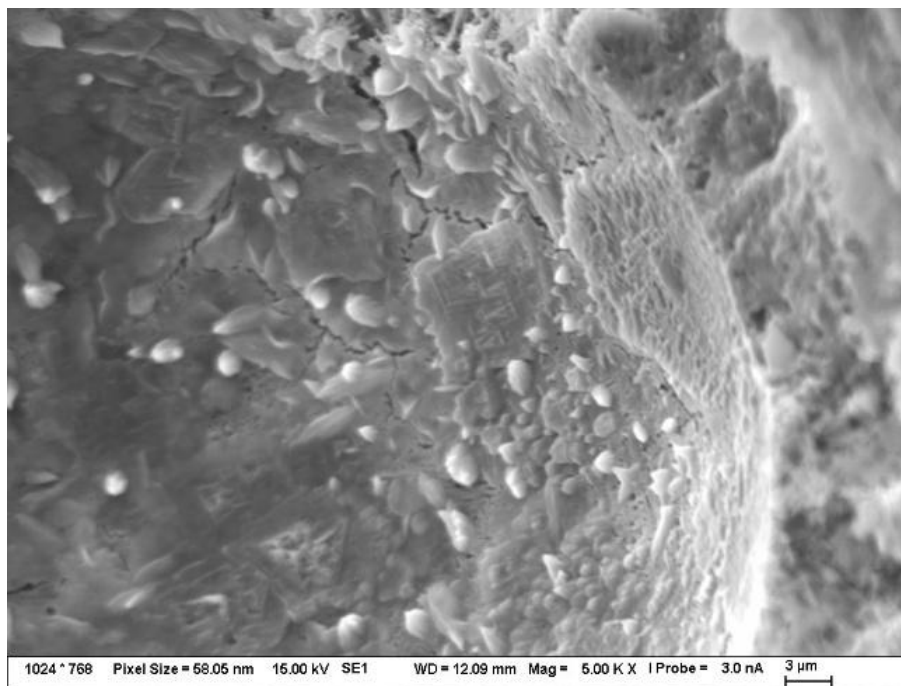
**Obrázek 3: Vzhled lomových ploch trámečků z pojivové pasty po fenolftaleinové zkoušce po 2 dnech v CO<sub>2</sub> komoře.**



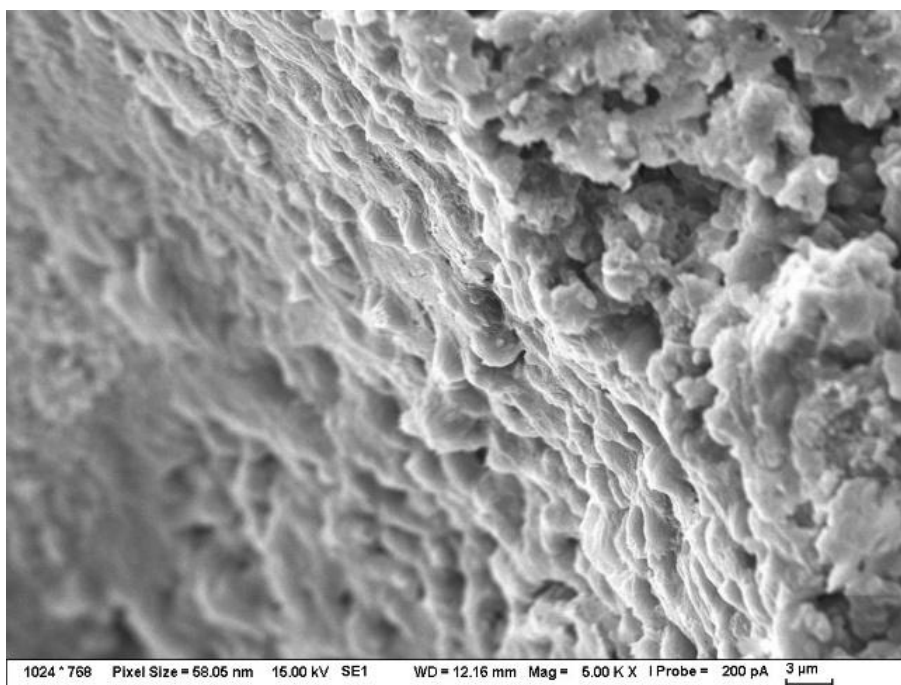
**Obrázek 4: Vzhled lomových ploch trámečků z pojivové malty po fenolftaleinové zkoušce po 2 dnech v CO<sub>2</sub> komoře.**

Výsledky ukazují, že zrychlená karbonatace výrazně zvyšuje pevnost tohoto pojiva (viz výsledky v tabulce 3 a 4). Trámečky po 2 dnech v CO<sub>2</sub> komoře vykazují 2krát (v případě pasty) a až 6krát (v případě malty) vyšší pevnost v tlaku než trámečky vyrobené z malty po 28 dnech hydratace ve vlhkém prostředí. U malty je vyšší stupeň karbonatace ve srovnání s pastami pravděpodobně způsoben vyšší pórovitostí, která umožňuje lepší pronikání CO<sub>2</sub>. Vyšší pevnost malty je pak způsobena vyšším stupněm prorůstání uhličitanu vápenatého.

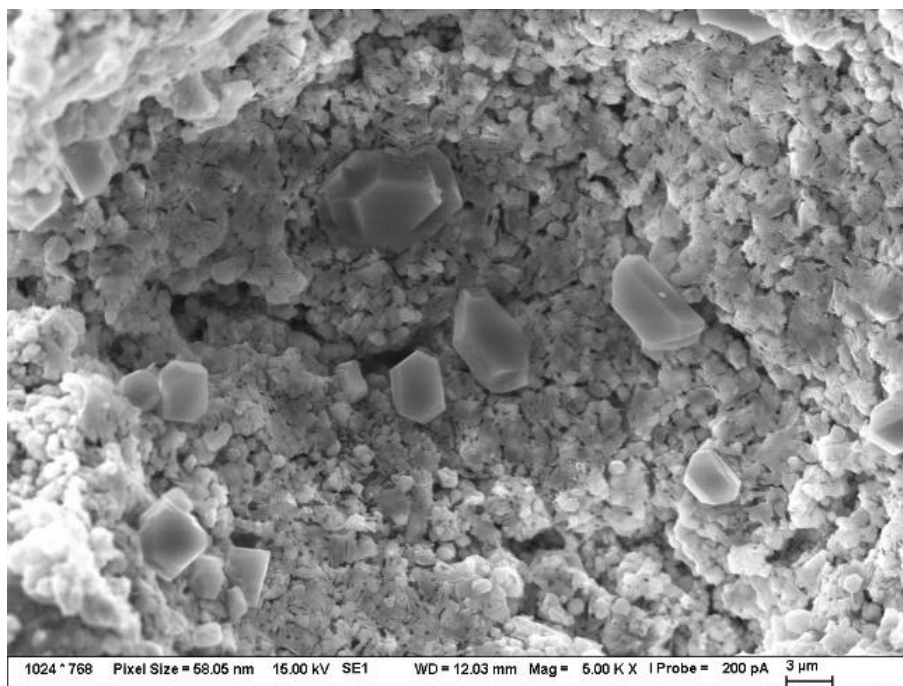
Na obrázcích 5 – 7 jsou patrné příklady mikrostruktury v místě lomu vybraných trámečků po 2 a 7 dnech karbonatace a 7 dnech hydratace. Zda se jedná o krystaly kalcitu nebo portlanditu, bylo určeno podle morfologie krystalů a potvrzeno orientační EDS analýzou, zejména podle obsahu uhlíku a vápníku. Výsledky průměrných analýz z 10 krystalů ve vzorku ACW 1100 po 2 dnech karbonatace a 7 dnech hydratace jsou uvedeny v tabulce 5.



**Obrázek 5: Lom trámečku ACW 1100 po 2 dnech karbonatace – část póru vyplněná kalcitem (SEM – BSE).**



**Obrázek 6: Lom trámečku ACW 1100 po 7 dnech karbonatace – krystaly kalcitu na okraji póru s patrnými přírůstkovými zónami (SEM – BSE).**



**Obrázek 7: Lom trámečku ACW 1100 po 7 dnech hydratace ve vlhkém prostředí – pór s patrným tabulkovitým portlanditem (SEM – BSE).**

**Tabulka 5: Průměrná prvková analýza krystalů ve vzorku ACW 1100 po 7 dnech hydratace a 2 dnech karbonatace v CO<sub>2</sub> komoře stanovená EDS analyzátořem.**

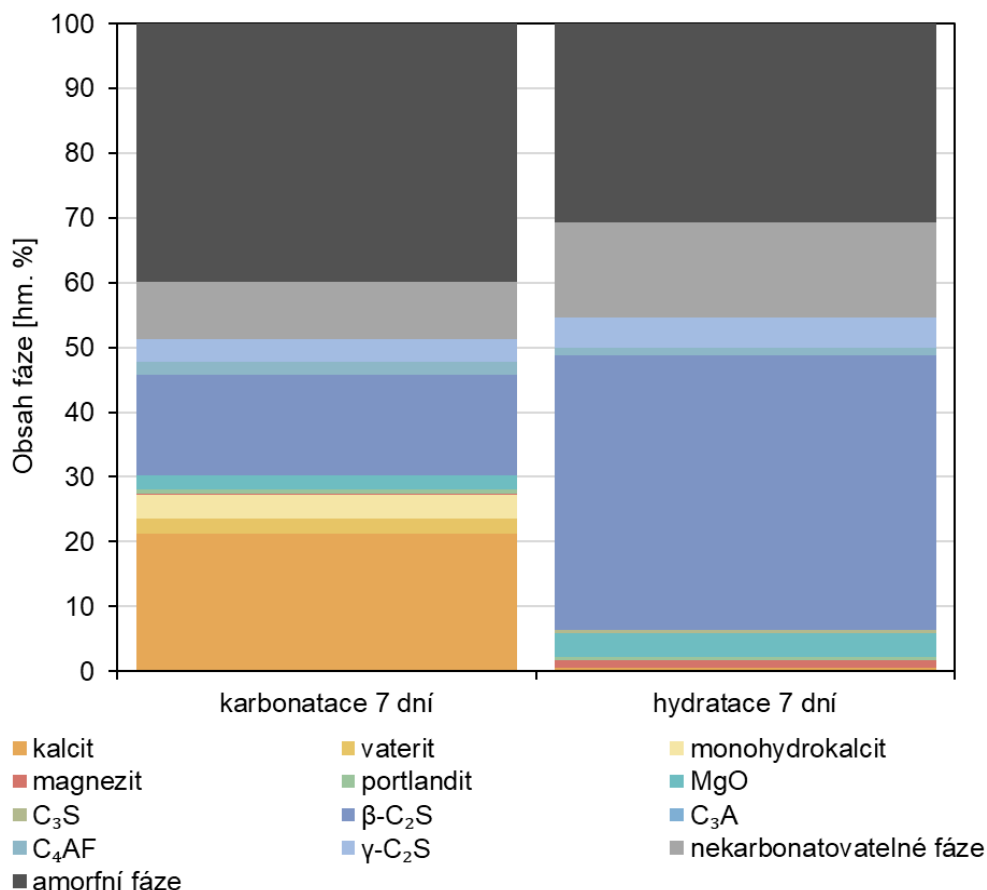
Prvek	Portlandit hydratace 7 dní	Kalcit karbonatace 2 dny
C	4,54	13,93
O	46,57	52,77
Na	0,00	0,13
Mg	1,17	1,27
Al	1,09	1,35
Si	5,34	4,52
S	0,30	0,36
K	0,03	0,36
Ca	39,52	23,98
Fe	1,44	1,26
Suma	100,00	99,93

Změny fázového složení během karbonatace a porovnání s fázovým složením během hydratace jsou patrné na obrázku 8 – 10. Je zřejmé, že kromě karbonatace s tvorbou uhličitánů vápenatých (hlavně kalcitu a v menší míře vateritu) dochází v CO<sub>2</sub> komoře také k hydrataci slínekových fází. Pokles obsahu belitu je po 7 dnech karbonatace vyšší než po 7 dnech hydratace ve vlhkém uložení. Není jasné, zda k tomu kromě zvýšené teploty v komoře (30 °C) přispívá i působení CO<sub>2</sub>.

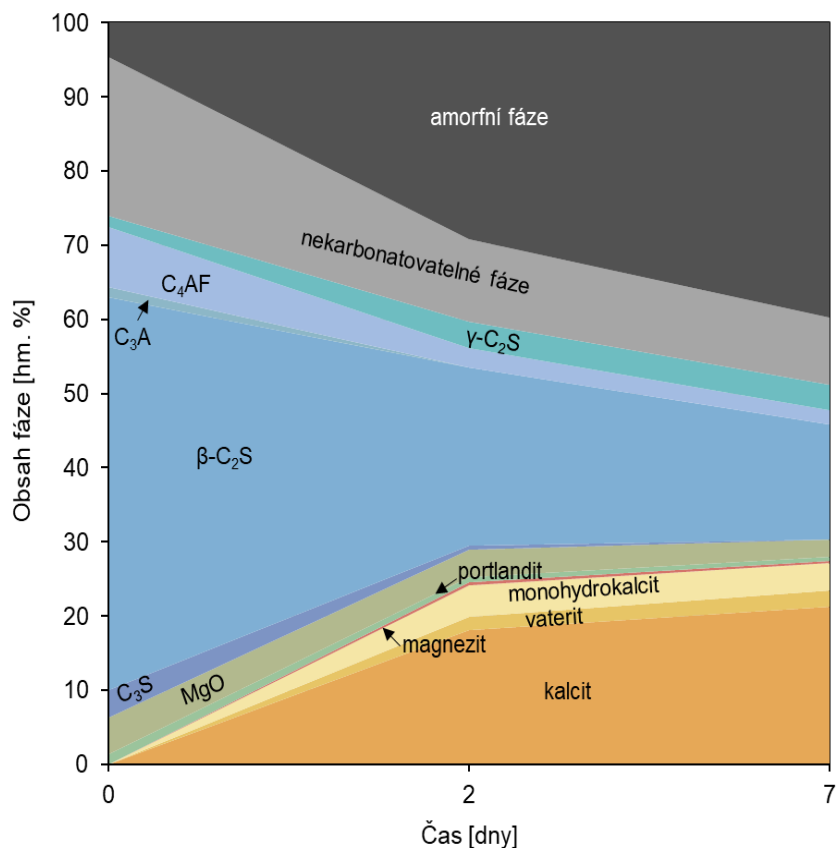
Rentgenová difrakce (XRD) také potvrdila malé množství magnezitu (MgCO<sub>3</sub>), který vzniká z hořčíku obsaženého v chryzotilu, jak popisuje Radvanec a kol.<sup>12</sup> Studie zároveň uvádí, že vypal při 650 °C s následnou karbonatací neutralizuje vysoké pH, inertizuje nebezpečný chryzotil a činí tak eternit bezpečným pro likvidaci nebo další použití. Uvedený proces také trvale eliminuje část průmyslových emisí CO<sub>2</sub>. V našem případě však lze získat nový produkt použitelný ve stavebnictví. Ve vzorcích sycených oxidem uhličitým po dobu 2 a 7 dnů byl také identifikován monohydrokalcit. Vzniká karbonatací

sloučenin obsahujících vápník v prostředí bohatém na hořčík, což je i příklad tepelného rozkladu chryzotilu v azbestocementovém odpadu a je to v souladu s literaturou popisující jeho krystalizaci čtyřstupňovým procesem z amorfního prekursoru obsahujícího hořčík<sup>19</sup>.

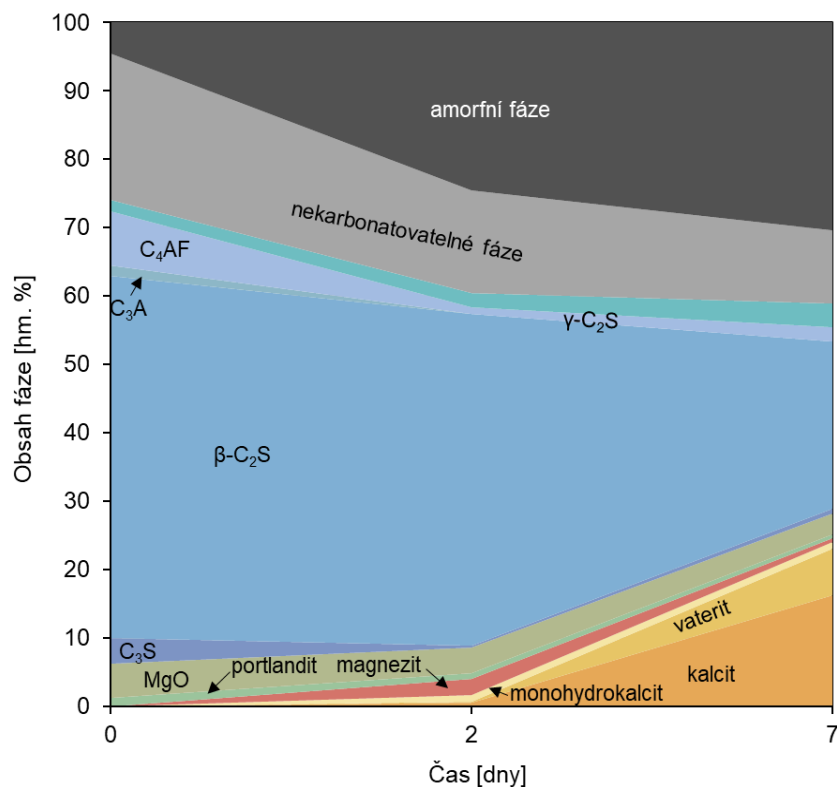
S ohledem na nejvyšší stupeň karbonatace lze konstatovat, že po 7 dnech v CO<sub>2</sub> komoře je pojivo připravené z azbestocementového odpadu schopno vázat až 103 kg CO<sub>2</sub> na 1 tunu hmoty. Hodnota byla stanovena na základě změn fázového složení zjištěných metodou XRD.



**Obrázek 8: Porovnání fázového složení pojivové pasty po 7 dnech karbonatace a 7 dnech hydratace.**



**Obrázek 9: Změny fázového složení mezi původním a karbonatovaným vzorkem pojivové pasty po 2 a 7 dnech uložení v  $CO_2$  komoře (povrch trámečku).**



**Obrázek 10: Změny fázového složení mezi původním a karbonatovaným vzorkem pojivové pasty po 2 a 7 dnech uložení v  $CO_2$  komoře (střed trámečku).**

## Závěry

Příspěvek se zabývá likvidací nebezpečného azbestocementového odpadu tepelným procesem s následným využitím vzniklého produktu. Během procesu výpalu procházejí azbestová vlákna fázovými a strukturními transformacemi, čímž vzniká materiál, který je po následném mletí bezpečný a vykazuje vlastnosti hydraulického vápna. Produkt lze použít buď jako samostatné pojivo, nebo v suchých maltových a omítkových směsích. Produkt může také fungovat jako karbonatovatelné pojivo, schopné zachytávat nežádoucí CO<sub>2</sub>, a lze jej použít k výrobě prefabrikovaných výrobků ve specializovaných CO<sub>2</sub> komorách. Tento dvojitý přístup řeší dva naléhavé problémy: bezpečnou likvidaci azbestového odpadu a snižování emisí CO<sub>2</sub>. Navrhovaná metoda může využívat stávající průmyslovou infrastrukturu, jako jsou vápenické šachtové pece, kde lze azbestocementový odpad zpracovávat společně s vápencem v poměrech přizpůsobených požadovaným vlastnostem výsledného produktu. Pojivo získané z vypálených eternitových šablon vykázalo po 2 dnech karbonatace 6krát větší pevnost v tlaku, než byla pevnost v tlaku po 28 dnech při běžné hydrataci. Kromě toho může pojivo vázat až 103 kg CO<sub>2</sub> na 1 tunu hmoty.

## Poděkování

Příspěvek byl vypracován v rámci projektu číslo SS07020041, spolufinancovaného Technologickou agenturou České republiky a Ministerstvem životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život a Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost.

## Literatura

1. Favero-Longo S.E., Turci F., Fubini B., Castelli D., Piervittori R.: *Int. Biodeter. Biodegr.* 84, 342 (2013).
2. Cilia C., Panigada C., Rossini M., Candiani G., Pepe M., Colombo R.: *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 4, 928 (2015).
3. Fiumi L., Campopiano A., Casciardi S., Ramirez D.: *Appl. Geomat.* 4, 55 (2012).
4. Spurny K. R.: *Environ. Res.* 48, 100 (1989).
5. Oskierski H. C., Dlugogorski B. Z., Jacobsen G.: *Chem. Geol.* 358, 156 (2013).
6. Trapasso F., Croci D., Plescia P., Tempesta E.: *Conference Paper of 3rd International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, 12 – 14 September 2012*, (Gidakos E., Cossu R., Stegmann R. ed.) Crete, Greece.
7. Spasiano D., Pirozzi F.: *J. Environ. Manage.* 204, 82 (2017).
8. Gualtieri A.F.: In: *Handbook of recycled concrete and demolition waste* (Pacheko-Torgal F., Tam V.W.Y., Labrincha J.A., Ding Y., de Brito J., ed.), 500, Woodhead Publishing Limited, 2013.
9. Viani A., Gualtieri A.F., Pollastri S., Rinaudo C., Croce A., Urso G.: *J. Hazard. Mater.* 248-249, 69 (2013).
10. Staněk T., Boháč M., Zezulová A., Rybová A.: *Solid State Phenomena* 276, 3 (2018).
11. Akelytė R., Chiabrando F., Camboni M., Ledda C., Vencovsky, D., Butera, S., Dünger O.: *Study on Asbestos Waste Management Practices and Treatment Technologies*. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2024.
12. Radvanec M., Tuček L., Derco J., Čechovská, K., Németh Z.: *J. Haz. Mat.* 252–253, 390 (2013).
13. Gadikota G., Natali C., Boschi C., Park A.H.: *J. Haz. Mat.* 264, 42 (2014).
14. Colangelo F., Cioffi R., Lavorgna M., Verdalotti L., De Stefano L.: *J. Haz. Mat.* 195, 391 (2011).
15. Lo Y., Lee H.M.: *Building and Environment* 37, 507 (2002).
16. Taylor H.F.W.: *Cement Chemistry*, Academic Press, London 1990.
17. Carneiro G.O., Santos T.A., Simonelli G., Ribeiro D.V., Cilla M.S., Dias C.M.R.: *J. Clean. Prod.* 320, 128801 (2021).

Theodor STANĚK, Martin NGUYEN, Michaela KREJČÍ KOTLÁNOVÁ, Jiří HOLUB, Zdeněk KREJZA: *Transformace nebezpečného azbestocementového odpadu na bezpečné funkční produkty*

18. Takata A., Yamauchi H., Yamashita K., Aminaka M., Hitomi T., Toya T., Kohyama N.: *Ind. Health* 63, 14 (2025).
19. Rodrigues-Blanco J.D., Shaw S., Bots P., Roncal-Herrero T., Benning L.G.: *Geochim. Cosmochim. Ac.* 127, 204 – 220 (2014).

## **Transformation of hazardous asbestos-cement waste into safe functional products**

**Theodor STANĚK<sup>a</sup>, Martin NGUYEN<sup>a</sup>, Michaela KREJČÍ KOTLÁNOVÁ<sup>a</sup>, Jiří HOLUB<sup>b</sup>, Zdeněk KREJZA<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Czech Republic, e-mail: [stanek@vush.cz](mailto:stanek@vush.cz)

<sup>b</sup>LB Cemix, s.r.o., Czech Republic

### **Summary**

*Asbestos-cement materials are among the most widespread forms of hazardous waste containing asbestos. Their disposal is usually carried out in the form of landfilling. However, in the current circular economy, they can advantageously serve as a raw material for the production of building materials. By burning them in a shaft furnace without prior treatment and grinding after thermal inertization, it is possible to obtain a hydraulic binder. In addition, the binder is carbonatable and can be used to produce prefabricated parts in CO<sub>2</sub> chambers. The resulting product could thus contribute to the very current goal of today, which is the reduction of greenhouse gas emissions. In the first case, it is possible to obtain a hydraulic binder of the strongly hydraulic lime type with a compressive strength after 28 days of over 5 MPa. Using accelerated carbonation, the compressive strength after 2 days increases 6 times. The research used methods of X-ray fluorescence analysis, X-ray diffraction, optical and electron microscopy and technological tests according to the EN 196 series standards.*

**Keywords:** Hazardous waste, asbestos cement, hydraulic lime, carbonatable binder.