

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Czech Technical University in Prague**

**Faculty of Civil Engineering**

**Ing. Alena Vimmrová, Ph.D.**

**Možnosti přípravy lehkých materiálů na bázi sádry**

**Methods for preparation of lightweight gypsum based materials**

## Summary

The importance of gypsum-based materials, as environmentally friendly and sustainable building materials easy to produce, with balanced functionality and aesthetics and a low price, is permanently growing. New expansion possibilities in utilization of these materials are currently being explored. One of the possible ways how to extend the use of the gypsum-based materials is the development and production of the lightweight materials and products. This is a very actual topic, because such materials have better thermal insulation properties, attractive acoustic behaviour and also moderate transport costs.

Lightening methods of gypsum are similar to the methods used for other inorganic binders, although it is necessary to take into consideration the different behaviour, preparation and particularly quite different chemical composition of the gypsum-based binders. The gypsum can be lightened indirectly through use of lightweight fillers or directly by creating pores in the gypsum matter, either chemically or mechanically.

As a lightweight filler for the indirect lightening inorganic materials (perlite, vermiculite), foamed polymers (new and recycled) or natural materials (e.g. cork) can be used. The principle of chemical lightening lies in the finding of the appropriate chemical reaction, during which the foaming gas (mainly carbon dioxide and oxygen) is released. The last method consists in using surface active substances to create the pores.

Lightweight gypsum based materials can be used as a thermal insulation plasters, light fire resistant plasters, thermal insulating blocks for partitions, dry mixes for in situ made plasters or as a core of the thermal insulating plasterboards.

## **Souhrn**

Význam sádry, jednoho z environmentálně nejpříznivějších stavebních pojiv s jednoduchým způsobem výroby, vyhovujícími vlastnostmi a příznivým vzhledem, trvale vzrůstá a proto jsou hledány nové způsoby jejího uplatnění. Jednou z možností, jak nabídku sádrových produktů rozšířit, je vývoj a výroba lehkých materiálů na bázi sádry. Použití lehkých materiálů je v současnosti velmi aktuální, neboť tyto materiály mají lepší tepelně izolační vlastnosti, výborné akustické vlastnosti a nižší dopravní náklady.

Metody, používané k vylehčování sádry se v zásadě neliší od metod, používaných i pro jiná anorganická pojiva, je však nutné brát ohled na její odlišnou přípravu a chování a zejména zásadně odlišné chemické složení sádrových pojiv. Sádra může být lehčena nepřímo pomocí lehkých plniv či přímo vytvářením pórů v sádrové hmotě, ať již chemicky nebo fyzikálně.

Jako lehké plnivo lze použít anorganické zrnité materiály (perlit, vermikulit), pěnové plasty (nové i recyklované) či přírodní materiály (např. korek). Chemické lehčení spočívá v nalezení vhodné chemické reakce, jejímž produktem je vylehčující plyn (nejčastěji oxid uhličitý a kyslík), který vytvoří v nezatuhlé sádrové hmotě póry. Poslední metodou je tvorba pórů pomocí povrchově aktivních látek, které ve směsi vytvoří pěnu.

Lehké materiály na bázi sádry je možno využít například jako lehké tepelně izolační omítky, protipožární lehké omítky, tepelně izolační tvárnice, lehké příčkové prvky, hotové směsi pro přípravu lehkých omítek na stavbě či jako jádro do lehkých tepelně izolačních sádrokartonů.

## **Klíčová slova**

lehká sádra, síran vápenatý, nepřímé lehčení, lehká plniva, přímé lehčení, chemické lehčení, povrchově aktivní látky

## **Keywords**

lightweight gypsum, calcium sulphate, indirect lightening, lightweight fillers, direct lightening, chemical lightening, surface active agent

## Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Metody vylehčování .....	7
3.	Nepřímé lehčení.....	7
3.1	Lehčení pomocí anorganických plniv.....	7
3.2	Lehčení pomocí polymerních plniv .....	8
3.1	Lehčení pomocí přírodních plniv.....	9
4.	Přímé lehčení.....	11
4.1	Chemické lehčení pomocí plynu .....	11
4.2	Lehčení pomocí povrchově aktivních látek .....	17
5.	Závěr.....	18
6.	Použitá literatura.....	20
	Autor .....	25

## 1. Úvod

V poslední době narůstá tlak na využití sádry (a obecně síranovápenatých pojiv) ve stavebnictví, neboť se jedná o pojiva s velmi nízkou energetickou náročností výroby, naprostou zdravotní nezávadností, vynikajícími požárními vlastnostmi a širokou surovinovou základnou, neboť sádro lze vyrábět i z celé řady odpadních produktů (například energosádrovce). Z těchto jsou hledány nové aplikační možnosti tohoto materiálu. Jednou z možností rozšíření produktové nabídky je výroba lehčených materiálů. Lehké stavební materiály jsou dnes velmi populární především pro své příznivé tepelně izolační vlastnosti, nižší dopravní náklady a snadnou manipulaci s nimi.

Zatímco v oblasti pojiv na bázi cementu a vápna již proběhl velmi intenzivní výzkum a vývoj lehkých materiálů, jehož výsledkem je široká průmyslová výroba řady z nich, v oblasti síranovápenatých pojiv takovýto výzkum v současnosti teprve probíhá. Jako příklad komerčně úspěšné lehké hmoty na bázi cementu a vápna lze uvést autoklávovaný pórobeton, který dnes patří k nejběžnějším stavebním materiálům. Příkladem nejmodernějších materiálů tohoto typu mohou být vysokohodnotné lehké betony. Na bázi sádry se však v průmyslové a komerční oblasti dosud prosadilo minimální množství produktů. V zásadě lze uvést pouze sádrové omítky s lehkým plnivem a výrobci sádrokartonu začínají na trh uvádět sádrokartonové desky s lehčeným jádrem.

Sádra sama o sobě není těžkým materiálem, její objemová hmotnost v zatvrdlé podobě se pohybuje obvykle mezi 1000 až 1500 kg/m<sup>3</sup>, hodnot objemové hmotnosti pod 1000 kg/m<sup>3</sup> však nelze obvykle dosáhnout bez nějakého způsobu vylehčení.

Pokusy o vylehčování sádry se datují již do počátku 20 století, kolem roku 1930 se objevují první patenty Ch. Gamarry [1,2], popisující výrobu lehké sádry pomocí chemického napěnění, přesto však zůstaly tyto pokusy většinou ve fázi výzkumu.

## 2. Metody vylehčování

Metody, používané k vylehčení sádry se v zásadě neliší od metod, používaných i pro jiná stavební pojiva, přičemž je samozřejmě nutné, zejména při chemickém vylehčování, brát ohled na zcela odlišné chemické složení síranovapenatých pojiv a je nutné zohlednit i odlišnosti v chování a přípravě těchto materiálů.

V zásadě lze vylehčovací metody rozdělit na metody přímé, kdy jsou vneseny póry do samotného sádrového materiálu a na metody nepřímé, při kterých je vylehčení dosaženo pomocí lehkého plniva.

V případě přímého lehčení mohou póry v materiálu vzniknout na základě vhodné chemické reakce, jejímž produktem je plyn, popřípadě je možné použít povrchově aktivní látky, které při vhodném zpracování napění.

### 2.1 Nepřímé lehčení

Nepřímé lehčení pomocí lehkého plniva lze považovat za nejjednodušší způsob vylehčování materiálů pojivového typu. Tato metoda je široce uplatňována zejména při výrobě lehkých betonů, tímto způsobem lze vyrobit vysokohodnotné lehké betony s velmi vysokými pevnostmi. Objemová hmotnost takových betonů se však pohybuje kolem 1500 až 2000 kg/m<sup>3</sup>, tedy ve zcela jiném rozsahu, než je požadován od vylehčené sádry.

Obecně se do sádrových materiálů plnivo (kamenivo) používá méně, není ho totiž v podstatě zapotřebí, neboť sádrové materiály se při tuhnutí nesmršťují. Pokud je používáno hutné kamenivo, pak především z důvodů zvýšení pevnosti.

### 2.2 Lehčení pomocí anorganických plniv

Nejčastějším lehkým plnivem, používaným do sádry je expandovaný perlit, popřípadě vermikulit. V případě komerčně prodávaných lehkých omítkových směsí na bázi sádry jsou používána v podstatě jen tato dvě plniva. Jejich použití je výhodné i z požárních důvodů, neboť jak perlit, tak vermikulit, jako anorganická plniva, nezhoršují vynikající požární vlastnosti sádrových materiálů. Objemová hmotnost takovýchto komerčních produktů se obvykle pohybuje nad 800 kg/m<sup>3</sup> [3], výjimečně lze nalézt i produkty s nižší objemovou hmotností [4].

Experimentálně byl perlit použit např. v práci Demira a Baspinara [5], kteří ho použili v množství 5 - 10 % hmot. jako plnivo do hmot tvořených

sádrou, vápnem, popílkem a křemičitým úletem a získali tak materiál s objemovou hmotností o cca 20 % nižší než měla hmota bez perlitu. Genzel a kol. [6] použili jako lehké anorganické plnivo vermikulit v kombinaci s polypropylenovými vlákny. Přídavkem až 20 % vermikulitu dosáhli pouze mírného snížení objemové hmotnosti (cca o 10 %) při ztrátě pevnosti až o 30 %, tepelná vodivost tohoto materiálu však významně poklesla, téměř o 30 %.

Zajímavým experimentem je použití expandovaného silikagelu (tj. granulovaného, silně pórovitého gelu  $\text{SiO}_2$ ), běžně používaného jako sušidlo. Silikagel byl expandován při teplotě 1200 °C a expandované granule byly přidány v množství 5 až 15 % hm. do sádrové hmoty [7]. Vzhledem k poměrně vysoké ceně silikagelu a jeho energeticky náročné expanzi však tento materiál nemá v současnosti příliš velké komerční využití.

### 2.3 Lehčení pomocí polymerních plniv

Dalšími materiály, které lze použít jako lehké plnivo, jsou různé typy polymerů, zejména pěnových. V tomto případě je však nutno počítat s tím, že se zhorší požární vlastnosti materiálu a sádrové hmoty s tímto plnivem již nelze používat jako protipožární.

Nejběžnějším pěnovým polymerem je expandovaný polystyren, který použil například Garcia Santos [8] v kombinaci s polypropylenovými vlákny. Při použití 2 % expandovaného polystyrenu ve formě kuliček a 2 % polypropylenových vláken vznikl materiál s objemovou hmotností o 50 % nižší než měla čistá sádra a s ohybovou pevností o 23 % vyšší. Tento autor nezmiňuje žádné problémy s mícháním či zpracovatelností směsi, zatímco jiní uvádějí [9], že pro zlepšení spojení polystyrenových kuliček se sádrou bylo nutno do směsi přidávat epoxidovou pryskyřici. To zřejmě bylo způsobeno i tím, že byl polystyren přidáván ve větším množství (kolem 5 - 7 %), čímž vznikl materiál s velmi nízkou objemovou hmotností ( $200 \text{ kg/m}^3$ ), který však měl také velmi nízkou pevnost 0,18 MPa. Alternativně lze použít i drcený odpadní polystyren [10].

Zajímavých výsledků bylo dosaženo při použití odpadního polyamidového prachu (PA). Gutiérrez-González a kol. [11] testovali hmotu s vysokým obsahem polyamidového prachu se zrnitostí do 100  $\mu\text{m}$  (až do poměru PA prachu k sádrě 4:1. Stejní autoři použili i odpadní jemně mletou polyuretanovou pěnu (do velikosti 1,7 mm) z automobilového a stavebního



průmyslu [12] v objemovém poměru až 4:1 k sádře. Materiály s vyšším množstvím polyuretanové pěny však vykazovaly velmi nízké pevnosti (pod 1 MPa), za přijatelné lze považovat směsi s poměrem polyuretanu k sádře maximálně 1:1, které však měly objemovou hmotnost přes 1000 kg/m<sup>3</sup> (vylehčení cca o 25 %).

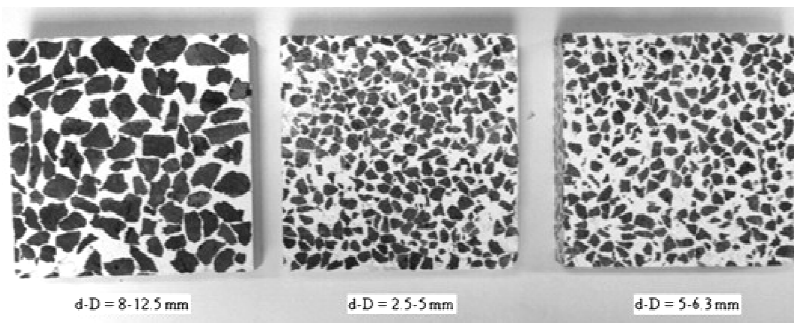
Dalším odpadním materiálem, který byl zkoušen v sádrových hmotách, je kaučuková drť z použitých pneumatik. U těchto materiálů však autoři konstatují výrazný pokles pevnosti již při obsahu drti kolem 5 % hm., horší zpracovatelnost a obtížnou homogenizaci směsi [13]. Herrero a kol. [14] zkoušeli kaučukové drti s různou zrnitostí a došli k závěru, že nejvhodnější je jemná drť se zrnitostí 0 - 0,6 mm. Podstatně se zlepšily akustické vlastnosti, testované materiály měly dobrou zvukovou pohltivost a schopnost tlumit vibrace

Rivero, Báez a Navarro [15] použili jako plnivo do sádry umletý pěnový kaučuk z vyřazené tepelné izolace potrubí. Vlastnosti výsledného materiálu kolísaly nejen v závislosti na množství plniva, ale především na jeho granulometrii. Nejvyšších objemových hmotností i pevností dosáhly hmoty s nejjemnějším plnivem (1- 2 mm), v případě směsí s největší frakcí plniva (20 - 25 mm) došlo k neúnosnému snížení pevností .

## 2.1 Lehčení pomocí přírodních plniv

Tradičně jsou do sádry používána různá plniva přírodního původu, ať již rostlinného nebo živočišného. Jedná se především o různá vlákna, některé materiály ale mohly zastávat i funkci plniva (např. slaměná řezanka, dřevěné piliny apod.).

Hernández-Olivares a kol. [16] použili jako lehké plnivo do sádrové hmoty granulovaný korek se zrnitostí do 12 mm. Materiály s 20 % korkového plniva měly objemovou hmotnost kolem 800 kg/m<sup>3</sup> a pevnost v tlaku kolem 5 MPa v závislosti na použitém typu korku. Přidáním 2 % skleněných vláken vzrostla pevnost v ohybu na dvojnásobek. Zajímavý materiál vyrobili Cherki a kol. [17], kteří sádrou pouze spojili maximální množství korku, které se vešlo do daného objemu. Použili korkovou drť s různou zrnitostí (obr.1) a vznikly tak materiály s objemovou hmotností pod 500 kg/m<sup>3</sup> a tepelnou vodivostí kolem 0,1 W/m.K.



Obr. 1: Sádrové materiály s drceným korkem s různou zrnitostí [17]

Tab. 6: Vlastnosti některých sádrových hmot s lehkým plnivem

Zdroj	Druh plniva	Množství	Obj. hmotnost	Pevnost v tlaku	Souč. tep. vodivosti
			[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[W/m.K]
[3]	Expand. perlit <sup>1)</sup>	neudáno	830	> 2,5	0,32
[4]	Vermikulit <sup>1)</sup>	neudáno	240 - 288	0,8	neudáno
[5]	Expand. perlit	10 % hm.	730	3,2	0,16
[6]	Vermikulit	20 % hm.	890	2,3	0,42
[7]	Expand. silikagel	15 % hm.	900	2,4	0,16
[9]	Expand. polyst.	5 - 7 %	200 - 600	0,2 - 2,7	N.A.
[11]	Polyamid. prach	PA : sádra 4 : 1	750	1,5	0,16
[12]	Mletá PUR pěna	PUR :sádra 4 : 1	516	< 1	0,1
		2 : 1	880	2	0,19
[14]	Kaučuková drť	50 % hm.	650 - 890 <sup>2)</sup>	1,2 - 1,6 <sup>2)</sup>	0,15 - 0,18 <sup>2)</sup>
[15]	Pěnový kaučuk	7,5 % hm.	560 - 950 <sup>2)</sup>	1,0 - 4,9 <sup>2)</sup>	neudáno
[16]	Korková drť	20 % hm.	810 - 1074 <sup>3)</sup>	4,9 - 8,2 <sup>3)</sup>	0,19 - 0,20 <sup>3)</sup>
[17]	Korková drť	-	450 - 470 <sup>2)</sup>	neudáno	0,09 - 0,12 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> komerční produkt  
<sup>2)</sup> v závislosti na zrnitosti plniva  
<sup>3)</sup> v závislosti na druhu korku

### 3. Přímé lehčení

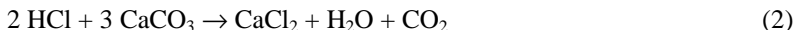
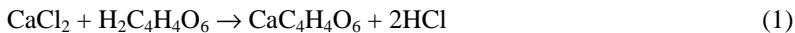
O přímém lehčení hovoříme tehdy, když do směsi anorganického pojiva (v tomto případě sádry) jsou přímo vneseny póry. Ty mohou ve směsi vzniknout na základě chemické reakce, jejímž produktem je plyn (nejčastěji oxid uhličitý, může to však být i vodík či kyslík). Druhou možností je použití povrchově aktivních látek, které ve směsi vytvoří pěnu.

#### 3.1 Chemické lehčení pomocí plynu

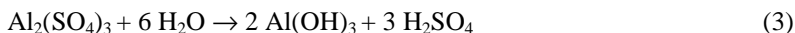
Chemické složení sádry se zásadně liší od chemického složení jiných anorganických pojiv a výrazně se liší se také pH. Zatímco cement a vápno obsahují hydroxid vápenatý a jsou silně alkalické, sádra obsahuje převážně síran vápenatý a je neutrální až kyselá. Proto i chemické reakce, které mohou být použity k vývoji vylehčovacího plynu, se zásadně liší od metod, používaných pro chemické vylehčování cementu či vápna.

Chemické lehčení v důsledku chemické reakce popisují již první práce z oblasti vývoje lehké sádry [1]. Nejstarší, ale dosud nejčastěji používanou metodou je pění pomocí oxidu uhličitého, vznikajícího při reakci uhličitanu nebo hydrouhličitanu s kyselé reagující složkou. Uhličitan vápenatý je v sádře přítomen téměř vždy, v množství nepřesahující většinou 2 %. Toto množství není většinou považováno za dostatečné z hlediska optimální rychlosti reakce, a proto bývá ještě dodatečně přidáván, například v podobě křídy, mletého vápence či hydrogenuhličitanu sodného. Nabízejí se i různé odpadní produkty, obsahující větší podíl uhličitanu vápenatého. Ve starších patentech se objevuje např. cukrovarnický kal, vznikající při rafinaci cukru [18], či vápenatý hnědouhelný popílek [19].

Jako kyselá složka jsou používány především anorganické kyseliny, popřípadě kyselce reagující soli. V US patentu z roku 2009 je jako kyselá složka přidávána kyselina fosforečná [20]. Gamarra [1] v patentu z roku 1931 popisuje kyselou složku, tvořenou kyselinou vinnou a chloridem vápenatým. V průběhu reakcí (1) a (2) nejprve reaguje dobře rozpustný chlorid vápenatý s kyselinou vinnou za vzniku vínanu vápenatého, který je velmi málo rozpustný a kyseliny chlorovodíkové. Ta pak reaguje s uhličitanem vápenatým za vzniku oxidu uhličitého, který má funkci vylehčovacího plynu.



Nejrozsáhlejší práci v oblasti vylehčování sádry provedl Colak, [21], který vyzkoušel několik způsobů přípravy lehčené sádry. V rámci práce zformuloval a připravil dvě chemicky napěněné hmoty. První z nich byla pěněna pomocí reakce síranu hlinitého (a alternativně síranu draselno-hlinitého) s mramorovým prachem. Síran hlinitý ve vodném roztoku hydrolyzuje za vzniku kyseliny sírové (3), která dále reaguje s uhličitánem vápenatým v mramorovém prachu (4). Vylehčovacím plynem je opět oxid uhličitý. Dále byla do směsi přidána kyselina citronová jako zpomalovač tuhnutí a pro zlepšení viskozity směsi karboxylmetylceluloza.

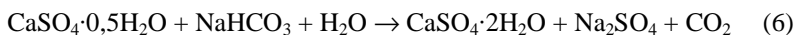


Při druhé variantě pěníni použil Colak hydrogenuhlíčan amonný, který se ve vodě rozkládá na amoniak a oxid uhličitý (5). Do směsi byla opět přidána kyselina citronová a celulóza.



Hmoty, které byly takto připraveny, měly objemovou hmotnost kolem 600 - 700 kg/m<sup>3</sup>, jejich pevnost v tlaku však byla velmi nízká (ve většině případů pod 1 MPa).

Pěníni pomocí hydrogenuhlíčitanu sodného použili i Rubio-Avalos a kol. [22]. Dosáhli sice podstatného vylehčení oproti nenapěněné sádře (o 40 %), protože však původní směs měla na sádru překvapivě vysokou objemovou hmotnost 2300 kg/m<sup>3</sup>, byla i objemová hmotnost vylehčeného materiálu relativně vysoká. Pevnost přitom klesla o téměř 50 %. Pěnící reakce je popsána rovnicí (6).



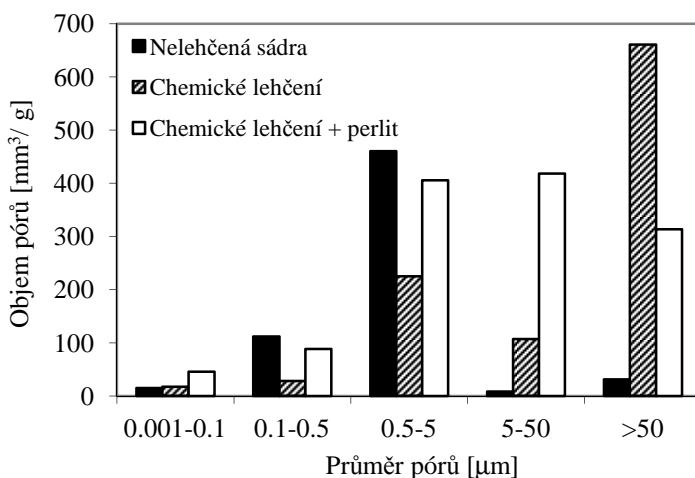
Autorka a kol. [23] se zabývala vývojem hmot, lehčených pomocí síranu hlinitého za přídatku křídý. Podařilo se vyvinout materiál s velmi nízkou objemovou hmotností pod 300 kg/m<sup>3</sup> a součinitelem tepelné vodivosti 0,08 W/m.K, jeho pevnost však byla také nízká (0,3 MPa v tlaku). Materiály s objemovou hmotností mezi 600 a 700 kg/m<sup>3</sup> již měly pevnosti kolem 3 MPa a jejich tepelná vodivost byla také velmi příznivá (0,16 W/m.K).

Poměrně kuriózní příprava pěnové sádry je popsána v německém patentu z roku 2012 [24]. Příprava lehké sádrové hmoty spočívá v tom, že nejprve je

smíchána zředěná kyselina sírová s malým množstvím sádry a směs je zahuštěna bentonitem či jiným jílem do podoby husté kaše. Poté je přidána směs sádry a mletého vápence. Napěňující reakce probíhá podle rovnice (4).

Hlavním problémem takto chemicky vylehčovanych hmot je jistá nehomogenita struktury. Reakce, při které vzniká oxid uhličitý je poměrně rychlá a bouřlivá a vznikající plyn tvoří póry nahodile a jejich velikost může kolísat od desetin milimetru až po několikamilimetrové bubliny v ztvrdlé směsi. Takto velké póry však nejsou žádoucí, protože podstatně zhoršují pevnost materiálu, a také transport tepla i vlhkosti probíhá méně vhodným způsobem. Velikost a množství pórů lze ovlivňovat například regulací rychlosti reakce vývoje plynu či vhodnou viskozitou směsi (tj. množstvím vody či použitím plastifikátorů).

Dobrych výsledků bylo dosaženo přidáním menšího množství drobného lehčeného plniva (perlitu) [23] k chemicky pěněné hmotě. Drobné plnivo účinně přispělo k rozbití větších bublin a k homogenizaci pórů. Na grafu distribuce pórů (obr. 2) je vidět posun ve velikosti pórů směrem k menším průměrům, přičemž hodnota celkové pórovitosti neklesla. Jako plnivo by mohl sloužit i jiný materiál s vhodnou zrnitostí, lehká plniva jsou výhodná především proto, že nezvyšují objemovou hmotnost materiálu.



Obr. 2: Rozdíly v distribuci pórů [23]

Další možností pěnění je využití reakce izokyanátů s vodou, při níž se uvolňuje opět oxid uhličitý. Tato metoda výroby lehké sádry je popsána např. v US patentu z r. 1979 [25] či v kanadském patentu z roku 1990 [26].

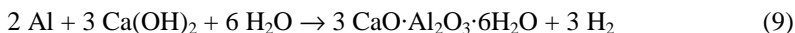


Méně často je produktem napěňovací reakce kyslík. Pro jeho vývin je používán vodný roztok peroxidu vodíku, který je přidáván do zalkalizované záměsové vody (např. hydroxidem draselným či sodným) [29], Autoři deklarují, že takto vyrobené materiály mají objemovou hmotnost kolem 500 kg/m<sup>3</sup> a mají výbornou zvukovou pohltivost. K rozkladu je jako katalyzátor použit síran kobaltnatý, viz rovnice (8).



Baux a kol. [30] zmiňují přípravu lehké hmoty s peroxidem vodíku, ve které je jako katalyzátor použit oxid manganičitý a do směsi je přidáván vaječný protein (albumin). V US patentu [31] je popsána výroba lehčené hmoty, vyráběné z anhydritu, při které je reakce rozkladu peroxidu regulována změnami pH. Výsledné materiály mají deklarované vysoké pevnosti při velmi nízkých objemových hmotnostech (4 - 5 MPa při objemové hmotnosti 250 kg/m<sup>3</sup> a při objemové hmotnosti 750 kg/m<sup>3</sup> až 47 MPa). Nebyl však nalezen žádný bližší popis tohoto materiálu ani důkazy o tom, že by byl popisovaný materiál dále vyvíjen, popř. se komerčně vyráběl, i když patent pochází již z r. 1977. Deklarované pevnosti se však při srovnání s výsledky ostatních autorů nezdají příliš věrohodné.

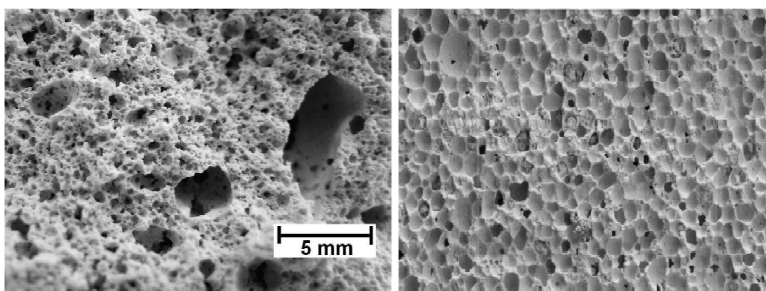
Nejčastěji používanou metodou výroby lehkých betonů na bázi vápna (autoklávovaného pórobetonu) je využití reakce hliníku s hydroxidem vápenatým, při níž se uvolňuje vodík (9).



Tuto reakci nelze použít k napěňování sádry přímo, z důvodů neutrálního až kyselého prostředí sádry a zejména proto, že sádra neobsahuje hydroxid vápenatý. Použití se nabízí v případě složených pojiv s dodaným obsahem Ca(OH)<sub>2</sub>, např. v podobě vápna. Reakci by tedy bylo možné úspěšně využít v materiálech na bázi sádry, obsahujících pucolánové složky, neboť pro zapojení těchto složek je vždy nutno přidávat hydroxid vápenatý. Pucolánové složky by také mohly zlepšit mechanické vlastnosti pórovité směsi, a také její odolnost směsi vůči vodě a vlhkosti. Této problematice

byla dosud věnována jen velmi malá pozornost, v dostupné literatuře byl nalezen jediný záznam o takovém materiálu [32]. Autoři článku vytvořili pojivo, tvořené fosfosádrovcem, vysokopecní struskou, cementem, páleným vápnem a síranem sodným. Hliníkový prášek byl přidáván v množství do 1 %. Síran sodný, který byl přidáván jako budič pucolánové reakce, se jeví v tomto případě jako nadbytečný, neboť funkci budiče ve směsi může dostatečně plnit portlandský cement. Materiál nebyl autoklávován, pouze propařován. Takto vytvořené materiály měly objemovou hmotnost v rozmezí 600 - 700 kg/m<sup>3</sup> a pevnost v tlaku 2,5 až 6,3 MPa v závislosti na poměru složek a na propařovací teplotě. Materiály vyhovovaly i z hlediska mrazuvzdornosti.

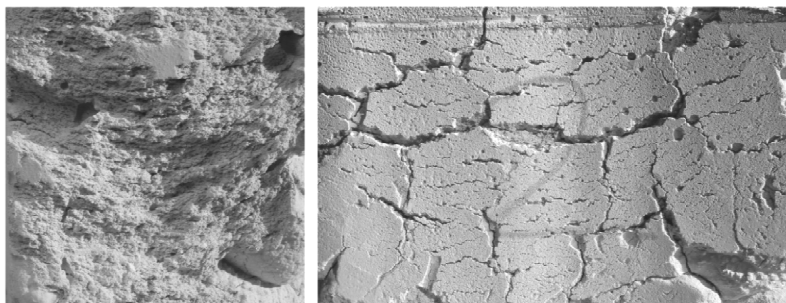
Autorka se zabývala výzkumem materiálů, tvořených směsí sádry a vápenného hydrátu, lehčených pomocí hliníku [33]. Vyvinuté hmoty měly objemové hmotnosti pod 700 kg/m<sup>3</sup>, jejich pevnost se však pohybovala pouze kolem 1 MPa. Protože reakce (9) probíhá podstatně pomaleji, než reakce při kterých vzniká oxid uhličitý (2, 4, 5), mají tyto hmoty podstatně homogennější strukturu a vzniklé póry mají menší průměr (obr. 3). Zde je hlavním problémem především to, že obecně sádra tuhne velmi rychle (v řádu minut) a tato pěnící reakce probíhá pomaleji. Pokud vzniká plyn v již zatuhlé hmotě s dosud nedostatečnou pevností, pak může dojít k potrhání směsi a ztrátě pevnosti (obr.4). Při příliš dlouhé době tuhnutí a přílišné tekutosti směsi pak naopak může dojít k úniku napěňovacího plynu a k poklesu vzniklé hmoty.



a) lehčení CO<sub>2</sub>

b) lehčení H<sub>2</sub>

Obr. 3: Rozdíl ve struktuře při různých způsobech lehčení



Obr. 4: Porušení zkušebního tělesa dodatečně vznikajícím plynem

Tab.2: Vlastnosti některých chemicky lehčených sádrových hmot

Zdroj	Pěnící složky	Pěnící plyn	Objemová hmotnost	Pevnost v tlaku	Součinitel tepelné vodivosti
			[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[W/m.K]
[21]	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , mramorový prach	CO <sub>2</sub>	667	0,88	
	KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , mramorový prach	CO <sub>2</sub>	843	1,65	
	NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	756	0,35	
[22]	NaHCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	1400	7	0,4
[23]	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , křída	CO <sub>2</sub>	661	2,7	0,16
[31]	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	250	4.5	0,08 - 0,09
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	750	43 - 47 <sup>3)</sup>	0,25 - 0,26
[32] <sup>1)</sup>	Al	H	686	6,3	0,15
[33] <sup>2)</sup>	Al	H	641	1,15	0,25

1) Pojivo z fosfosádrovce, vysokopecní strusky, cementu, páleného vápna, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
2) Pojivo ze sádry a vápenného hydrátu  
3) Uvedeno pouze pro úplnost, hodnoty nejsou hodnověrně doloženy.



### 3.2 Lehčení pomocí povrchově aktivních látek

Vylehčování pomocí povrchově aktivních látek (PAL) lze provádět dvěma způsoby. V prvním případě je povrchově aktivní látka přidána přímo do směsi a směs je intenzivně vysokou rychlostí míchána (našlehána) vhodným míchacím zařízením do potřebné objemové hmotnosti. V druhém případě je pěna vytvořena zvlášť ve speciálním zařízení (generátoru pěny), a poté je buďto opatrně smíchána s kaší z pojiva a případných dalších složek, nebo jsou pojivové složky postupně přidávány do vytvořené pěny. V případě sádrových hmot je tento způsob vylehčování poměrně běžný a existuje celá řada patentů, které takový způsob přípravy lehkých sádrových materiálů popisují [34, 35].

Jako povrchově aktivní látky jsou používány většinou komerčně nabízené tenzidy, nejčastěji na bázi laurylsulfátu sodného [21,36], byly však popsány i látky na bázi potravinářských doplňků metylcelulózy a jóta karagenanu (rostlinné želatiny) [37]. V čínském patentu [38] je popisováno složité pěnidlo, skládající se z rostlinného proteinu, rohoviny, hydroxidu sodného, hydrogensířčitanu sodného, kostního klišu, želatiny, lauryldiethanolamidu a řady dalších organických látek.

Hmoty vylehčované pomocí povrchově aktivních látek mají většinou nízkou, někdy až velmi nízkou pevnost [37, 38] pod 1 MPa, a to i v případě vyšších objemových hmotností. V některých případech (zejména v patentech) jsou zmiňovány hodnoty vyšší. Například v ruském patentu z roku 2012 [39] je popsána výroba značně složitěho materiálu, obsahujícího kromě sádry i fosfosádrovec, kyselinu vinnou, síran železitý, vodný roztok peroxidu vodíku a PAL, ke které je vmíchána vedle připravená pěna a deklarují, že při dosažené velmi nízké objemové hmotnosti  $215 \text{ kg/m}^3$  má tento materiál pevnost 1,75 MPa. V patentu se složeným činidlem zmíněném výše [38] autoři používají toto činidlo pro výrobu bloků ze sádry, získané z odpadního sádrovce z výroby  $\text{TiO}_2$  a udávají, že tyto bloky mají objemovou hmotnost nižší než  $620 \text{ kg/m}^3$  při pevnostech 5 MPa a více.

O zvýšení pevnosti pěnou lehčené sádry se pokusili Brencis a kol [40] pomocí různých dlouhých konopných vláken a dosáhli mírného zlepšení (z 0,3 MPa na 0,5 MPa), získané pevnosti však stále nelze považovat za dostačující pro běžné stavební účely. Autoři však tento materiál pro jeho vysokou akustickou pohltivost popisují jako vhodnou součást akustických opatření, kde takto nízká pevnost nemusí být na závadu.

Tab. 3: Vlastnosti hmot lehčených pomocí povrchově aktivních látek

Zdroj	Povrchově aktivní látka	Objemová hmotnost	Pevnost v tlaku	Součinitel tepelné vodivosti
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[W/m.K]
[36]	laurethsulfát sodný	903	0,11	
[21]	laurethsulfát sodný	708	0,44	
	nonyl fenol etoxylát	828	0,49	
[37]	methylceluloza,	750	0,35	
	iota-karagenan			
[41]	neudáno	200	< 0,1	0,07
	neudáno	700	2,2,	0,24
[30]	neudáno	650	2	0,24
[40]*	neudáno	400	0,4 - 0,5	
[38]	složené pěnidlo	≤ 620	≥ 5	
* přídavek 1,5 % konopných vláken				

#### 4. Závěr

Pomocí všech popsaných vylehčovacích metod lze vyrobit hmoty, které mají objemové hmotnosti pod 1000 kg/m<sup>3</sup> a mají postačující mechanické, tepelně izolační a akustické vlastnosti.

Dosud jediným komerčně používaným způsobem lehčení je nepřímé lehčení pomocí lehkých plniv. Touto metodou lze vyrobit hmoty, které mají dostatečnou pevnost a jejich objemová hmotnost většinou neklesá pod 700 kg/m<sup>3</sup>. Způsob jejich přípravy se zdá být jednoduchý, neboť se jedná a pouhé přimíchání lehkého plniva do suché směsi a její následné zamíchání s vodou. Je však technologicky značně obtížné docílit dostatečně homogenní směs s pravidelně rozptýleným zrnitým plnivem, které má tendenci vyplavat na povrch nebo tvořit shluky. Pokud jsou jako lehké plnivo použity

organické materiály (ať již polymerní či přírodní), podstatně se zhorší požární vlastnosti těchto materiálů.

Jako neúčinnější se jeví chemické lehčení pomocí vyvíjeného plynu, kde byla vyvinuta celá řada postupů. Z nich je nejvýhodnější a nejlépe popsanou metodou lehčení pomocí oxidu uhličitého. Takto vyrobené hmoty mohou být velmi lehké (i pod  $300 \text{ kg/m}^3$ ) a mají vynikající tepelně izolační vlastnosti. I když samozřejmě pevnosti takto lehkých hmot nejsou příliš vysoké, pro některé specifické účely jsou dostačující. Vyšších pevností lze dosáhnout zvýšením objemové hmotnosti či přidávkem některých dalších aditiv, např. polymerních disperzí. Velkou výhodou tohoto způsobu lehčení je to, že zůstává zachována vynikající požární odolnost sádry. Příprava takovýchto materiálů je relativně jednoduchá, nejjednodušší se jeví smíchat všechny složky v suché podobě a poté suchou směs smíchat s vodou a nechat proběhnout vylehčující reakci. Největším problémem tohoto způsobu přípravy je vyladění doby tuhnutí a rychlosti reakce, aby vznikající plyn nepotrhal již zatuhlou (ale nedostatečně zatvrdlou) hmotu a naopak, aby z příliš dlouho tekuté směsi neunikl veškerý vznikající plyn. O výhodnosti tohoto způsobu lehčení svědčí i to, že v současnosti probíhá finální vývoj těchto materiálů u řady výrobců, kteří hodlají tento typ lehčených hmot uvést v nejbližším období na trh.

Vylehčování pomocí povrchově aktivních látek je metodou nejméně zkoumanou a její výsledky jsou také nejhorší, zejména z hlediska mechanických vlastností. Pevnosti takto lehčených materiálů jsou obecně velmi nízké a proto by bylo i jejich využití značně omezené.

Lehké materiály na bázi sádry je možno využít například jako lehké tepelně izolační omítky, protipožární lehké omítky, tepelně izolační tvárnice, lehké příčkové prvky, hotové směsi pro přípravu lehkých omítek na stavbě či jako jádro do lehkých tepelně izolačních sádrokartonů.

## 5. Použitá literatura

- [1] GAMARRA Ch. Method of making aerated gypsum and resulting product. Vynálezce: Ch. GAMARRA. Int. Cl.: C04B28/14, US Cl.: 106/680. US Patent 1912702. Vydán 6.6.1933
- [2] BEMIS INDUSTRIES. Method of treating gypsum and resulting products. Vynálezce: Ch. GAMARRA. Int. Cl.: C04B 38/02 (2006.01), Canadian Cl.:261/47. Čís. patentu: CA305651. Vydán 11. 11. 1930
- [3] Technický list výrobku CASEA Casuplast 1200 [online]. Smet Building Products Limited [vid. 28.9.2015]. Dostupné z: <https://smet2-smetbuildingprod.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/04/TDS-CASEA-Casuplast-1200-Lightweight-One-Coat-Gypsum-Plaster.pdf>
- [4] Technický list výrobku Classic 5 LD [online]. The Schundler Company [vid. 28.9.2015]. Dostupné z: <http://www.schundler.com/classic5ld.htm>
- [5] DEMIR, Ismail; BASPINAR, M. Serhat. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. Construction and building materials. Vol. 22, No. 6, pp. 1299-1304, 2008. ISSN: 0950-0618
- [6] GENCEL, Osman; del COZ DIAZ, Juan Jose; SUTCU, Mucahit; et al. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. Energy and buildings. Vol. 70, pp. 135-144, 2014. ISSN: 0378-7788
- [7] BASPINAR, M. Serhat; KAHRAMAN, Erhan. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. Construction and building materials. Vol. 25, No. 8, pp. 3327-3333, 2011. ISSN: 0950-0618
- [8] GARCIA SANTOS, A. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. Materiales de construccion. Vol. 59, No. 293, pp. 105-124, 2009. ISSN: 0465-2746
- [9] SAYIL, B.; GURDAL, E. The physical properties of polystyrene aggregated gypsum blocks. In: 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components (8dbmc). Vancouver, Canada: Natl Research Council Canada. Durability of building materials and components 8, Vols. 1-4, Proceedings, pp. 496-504, 1999. ISBN:0-660-17737-4

- [10] GONZÁLEZ MADARIAGA F. J.; LLOVERAS MACIA J. Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. Informes de la Construcción. Vol. 60, No. 509, pp. 35-43, 2008. ISSN: 0020-0883
- [11] GUTIERREZ-GONZALEZ, S.; GADEA, J.; RODRIGUEZ, A.; et al. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. Construction and building materials. Vol. 34, pp. 179-185, 2012. ISSN: 0950-0618
- [12] GUTIERREZ-GONZALEZ, S.; GADEA, J.; RODRIGUEZ, A.; et al. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. Construction and building materials. Vol. 28, No. 1, pp. 653-658, 2012. ISSN: 0950-0618
- [13] SERNA, Angel; del RIO, Mercedes; GABRIEL Palomo, Jose; et al. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. Construction and building materials. Vol. 35, pp. 633-641, 2012. ISSN: 0950-0618
- [14] HERRERO, S.; MAYOR, P.; HERNANDEZ-OLIVARES, F. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. Materials & design. Vol. 47, pp. 633-642, 2013. ISSN: 0261-3069
- [15] JIMENEZ RIVERO, Ana; de GUZMAN BAEZ, Ana; GARCIA NAVARRO, Justo. New composite gypsum plaster - ground waste rubber coming from pipe foam insulation. Construction and building materials. Vol. 55, pp. 146-152, 2014. ISSN: 0950-0618
- [16] HERNANDEZ-OLIVARES, F.; BOLLATI, M.R.; del RIO, M.; et al. Development of cork-gypsum composites for building applications. Construction and building materials. Vol. 13, No. 4, pp. 179-186, 1999. ISSN: 0950-0618
- [17] CHERKI, Abou-bakr; REMY, Benjamin; KHABBAZI, Abdelhamid; et al. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. Construction and building materials. Vol. 54, pp. 202-209, 2014. ISSN: 0950-0618
- [18] GNII STR MATERIALOV IZDELIJ .Kompozicija dlja izgotovljenija gazogipsa. Vynálezce: Larionov Mikhail T.; Filakhtova Elizaveta A. Prihl. 1.8.1981. C04B14/42; C04B18/04; C04B28/14; C04B38/02; (IPC1-7): C04B11/09; C04B21/02. Čís. patentu: SU857044

[19] POLITECHNIKA WROCLAWSKA, Wrocław (Polska). Sposób wytwarzania gazogipsu. Vynálezce: Mazur, Stanisław; Kolarz, Bożena. Příhl.: 22.4.1966. MPT: C 0B. Čís. patentu: 54325. URZĄD PATENTOWY PRL

[20] Edgar Donald KNOTT. Foaming plaster. Vynálezce: Edgar Donald Knott. Příhl.: 16. 12. 2005. Int. Cl: C04B11/00, B32B5/18. Číslo patentu: US20090324931. United States Patent and Trademark Office

[21] COLAK, A. Density and strength characteristics of foamed gypsum. Cement & concrete composites. Vol. 22, No. 3, pp. 193-200, 2000. ISSN: 0958-9465

[22] RUBIO-AVALOS, JC; MANZANO-RAMIREZ, A; YANEZ-LIMON, JM; et al. Development and characterization of an inorganic foam obtained by using sodium bicarbonate as a gas generator. Construction and building materials. Vol. 19, No. 7, pp. 543-549, 2005. ISSN: 0950-0618

[23] VIMMROVA, Alena; KEPPERT, Martin; SVOBODA, Luboš et al. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. Cement & concrete composites. Vol. 33 , No. 1, pp. 84-89, 2011. ISSN: 0958-9465

[24] RESCH, Ludwig. Herstellung von Schaumgips. Vynálezce: RESCH, Ludwig. Příhl.: 03.06.2011. Int. Cl: C04B28/14; C04B38/06. Čís. patentu: DE 102011103519 A1. Das Deutsche Patent- und Markenamt

[25] HOECHST AG. Process for preparing foamed gypsum and constructional elements composed thereof. Vynálezce: STAHL Dieter; PUCHEL Ernst. Příhl.: 8.5.1979. Int. Cl: C04B24/00; C04B28/14. Čís. patentu: US4153470. United States Patent and Trademark Office

[26] RAUNHOFER GES FORSCHUNG. Plaster foam with porous structure, a process for its preparation and its use. Vynálezce: MEINHARDT Stefan; ERTEL Hanno. Int. Cl: C04B24/28; C04B28/14; C04B38/02; C08G18/30; C08K3/30. Čís. patentu: CA2044168. Canadian Intellectual Property Office

[29] KURASHIKI BOSEKI KK. Foamed gypsum moulded articles and production thereof . Vynálezce: SAITO Masumi; HIRAI Eiichi; ENDO Masao; NISHINO Toru. Int. Cl: C04B28/14; C04B38/02. Čís. patentu: US4330589. United States Patent and Trademark Office

- [30] BAUX C., LANOS C., PHELIPOT-MARDELÉ A. Mineral foams with improved performances. *Annales du bâtiment et des travaux publics*. Vol.: 2011, pp. 53 -57, 2011
- [31] BAYER AG. Production of foamed gypsum moldings. Vynálezce: MULLER Martin; HINSCHÉ Friedrich; WINTER Gerhard; BRANDLE Karl. Int. Cl: C04B28/14; C04B38/02. Čís. patentu: US4043825. United States Patent and Trademark Office
- [32] YANG, Lin; YAN, Yun; HU, Zhihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. *Construction and building materials*. Vol. 44, pp. 600-606, 2013. ISSN: 0950-0618
- [33] VIMMROVA, Alena; NAZMUNNAHAR, Mst; CERNY, Robert. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement Wapno Beton*. 2014, vol. 19/81, no. 5, p. 299-307
- [34] BPB PLC. A method of producing gypsum building board and gypsum board made by this method. Vynálezce: GAILLARD Nathalie A.; GEERAERT Emmanuel H. C. Int. Cl: C04B24/38. Čís. patentu: GB2444051. Intellectual Property Office
- [35] CHIANG Jin-Chih, CHAO Yen-Yau H. Foamed gypsum compositions. Vynálezce: CHIANG Jin-Chih, CHAO Yen-Yau H. Int. Cl: C04B24/00; C04B24/12; C04B24/16; C04B28/14; C04B38/10. Čís. patentu: US6602924. United States Patent and Trademark Office
- [36] Bazelova, Zora; Pach, Ladislav; Lokaj, Jan. The effect of surface active substance concentration on the properties of foamed and non-foamed gypsum. *Ceramics-Silikáty*. Vol. 54 , No. 4, pp. 379-385, 2010. ISSN: 0862-5468
- [37] Akthar, F. K.; Evans, J. R. G. High porosity (> 90%) cementitious foams. *Cement and concrete research*. Vol. 40 , No. 2, pp. 352-358, 2010. ISSN: 0008-8846
- [38] ZHENG BeiBei. Titanium gypsum foamed building block and preparation method thereof. Vynálezce: ZHENG BeiBei. Int. Cl: C04B22/06; C04B24/14; C04B24/32; C04B28/14; C04B38/02. Čís. patentu: CN103467056. State intellectual property office of the P.R.C.
- [39] Federalnoe gbjudzkhetnoe uchredzdenie nauki instorch i fizicheskoj khim im. A.E. Arbutova. Composition for making foamed gypsum articles. Vynálezce: BURILOV A. R.; BUDNIKOVA J. G.; GIBADULLINA E. M.

et al. Int. Cl: C04B38/02; C04B38/10. Čís. patentu: RU2461532. Federal service for intellectual property (Rospatent)

[40] BRENCIS, Raitis; SKUJANS, Juris; ILJINS, Uldis; et al. Research on Foam Gypsum with Hemp Fibrous Reinforcement. In: 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction. Florence, ITALY: AIDIC SERVIZI SRL AIDIC SERVIZI SRL . Book Series: Chemical Engineering Transactions. Vol. 25, pp. 159-164, 2011. ISBN:978-88-95608-16-7

[41] SKUJANS, Juris; VULANS, Andris; ILJINS, Uldis; et al. Measurements of heat transfer of multi-layered wall construction with foam gypsum. Applied thermal engineering. Vol. 27, No. 7, pp. 1219-1224, 2007. ISSN: 1359-4311



## **Autor**

**Ing. ALENA VIMMROVÁ, Ph.D.**

Katedra materiálového inženýrství a chemie,  
Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 16629 Praha 6  
e-mail: vimmrova@fsv.cvut.cz

**Datum narození:** 3.4.1962

## **Vzdělání**

- |           |   |
|-----------|---|
| 2001-2007 | Katedra stavebních hmot, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Ph.D. v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství, téma práce: Formulace materiálů na bázi sádrové pěny |
| 1980-1985 | Fakulta stavební ČVUT v Praze, Ing. v oboru Pozemní stavby, specializace Konstrukční soustavy- statická a dynamická analýza pozemních staveb                    |

## **Pracovní zkušenosti**

- |             |  |
|-------------|--|
| 2007        | Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební ČVUT v Praze - zástupce vedoucího katedry |
| 1998 - 2007 | Katedra stavebních hmot – Fakulta stavební ČVUT v Praze - zástupce vedoucího katedry                   |
| 1993-1998   | Katedra stavebních hmot – Fakulta stavební ČVUT v Praze - odborná asistentka                           |
| 1992-1993   | soukromá projektová praxe  |
| 1985-1992   | Výzkumný ústav pozemních staveb Praha, odd. Betonových konstrukcí - odborná asistentka                 |

## **Pedagogické zkušenosti**

- člen pedagogických rad studijního oboru Konstrukce pozemních staveb a Building Structures a studijního programu Architektura a stavitelství
- vedení bakalářských a diplomových prací, vedení projektů
- přednášky v předmětech Stavební hmoty, Stavební hmoty 2, Degradace stavebních materiálů, Building Materials, Building Materials 2
- cvičení v předmětech Stavební hmoty, Stavební hmoty 2, Building Materials, Building Materials 2

## **Oblasti výzkumu**

- experimentální a teoretická analýza mechanických, tepelných a transportních vlastností materiálů na bázi sádry
- návrh a vývoj kompozitů na bázi síranu vápenatého
- moderní optimalizační metody

Řešitelka 1 projektu MŠMT, členka řešitelského kolektivu 2 evropských grantů a 1 výzkumného záměru MSM.

## **Publikační a lektorská činnost**

- Autorka a spoluautorka 4 článků v mezinárodních impaktovaných časopisech, 5 článků v českých recenzovaných časopisech, 28 příspěvků na mezinárodních a českých konferencích, 5 knih, 3 vysokoškolských skript, 4 užitečných vzorů, 1 software.
- 26 citací v databázi Web of Science
- 11 lektorských posudků v mezinárodních časopisech, 21 oponentských posudků TAČR

## **Vybrané publikace:**

- Vimmrová, A.: Formulation of Gypsum Foam Materials. 1. ed. Praha: Czech Technical University in Prague, 2009. 122 p. ISBN 978-80-01-04413-1.
- Svoboda, L., Bažantová, Z., Myška, M., Novák, J., Tobolka, Z., Vimmrová A. et al.: Stavební hmoty. 3. vyd. Praha: Luboš Svoboda, 2013. 950 s. ISBN 978-80-260-4972-2.
- Černý, R., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Tesárek, P., Toman, J., Vimmrová A. et al.: Vlastnosti modifikované sádry. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. 134 s. ISBN 978-80-214-3988-7.
- Toman, J., Vimmrová, A., Černý, R.: Long-Term On-Site Assessment of Hygrothermal Performance of Interior Thermal Insulation System without Water Vapour Barrier. Energy and Buildings. 2009, vol. 41, no. 1, p. 51-55. IF = 2,884
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L., Černý, R.: Lightweight gypsum composites: design strategies for multi-functionality. Cement and Concrete Composites. 2011, vol. 33, no. 1, p. 84-89. IF = 3,33
- Vimmrová, A., Michalko, O., Černý, R., Keppert, M.: Calcined gypsum-lime-metakaolin binders: Design of optimal composition. Cement and Concrete Composites. 2014, vol. 52, p. 91-96. IF = 3,33
- Vimmrová, A., Nazmunnahar, M., Černý, R.: Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. Cement Wapno Beton. 2014, vol. 19/81, no. 5, p. 299-307. IF = 0,304
- Vimmrová, A.: New type of lightweight gypsum-based material. In Mechanical, Thermal and Hygric Properties of Buildings Materials. ZÜRICH: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2014, p. 108-113. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-172-6.
- Vimmrová, A., Nazmunnahar, M.: Lightweight Gypsum-Based Material, Foamed by Lime Dust and Acid Agent. In Materials, Mechanics and Information Engineering. Uetikon-Zürich: Trans Tech Publications, 2015, p. 3-8. ISSN 1662-7482. ISBN 978-3-03835-385-0.
- Vimmrová, A., Svoboda, L.: Hybridně lehčená sádrová hmota. Stavební obzor. 2008, roč. 17, č. 1, s. 8-10

- Vimmrová, A, Svoboda, L.: Příprava pěnové sádrové hmoty pomocí kyselého činidla. Stavební obzor. 2008, roč. 17, č. 9, s. 277-279.
- Vimmrová, A, Doleželová, M, Černý, R.: Ternární směsi na bázi sádry se zlepšenými mechanickými vlastnostmi. Stavební obzor [online]. 2014, roč. 23, č. 7-8, s. 126-131.
- Svoboda, L., Vimmrová, A.: Methods for Preparing of Chemical Foamed Gypsum. In Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials. Praha: ČVUT v Praze, FSv, 2007, p. 19-22. ISBN 978-80-01-03929-8.
- Vimmrová, A, Toman, J, Vejmelková, E.: Review of Methods for Thermal Conductivity Measuring. In Complex System of Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials. Praha: ČVUT v Praze, FSv, 2007, p. 55-66. ISBN 978-80-01-03929-8.
- Vimmrová, A.: Metodika zkoušení sádry podle platných norem. In Construmat 2007. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 388-391. ISBN 978-80-248-1536-7.
- Vimmrová, A, Keppert, M.: Vliv granulárního plniva na pórovitost lehčené sádry. In Sádra 2008. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, s. 44-49. ISBN 978-80-214-3769-2.
- Vimmrová, A, Svoboda, L.: Acid Agent for Preparation of the Gypsum Foam. In Proceeding of the 2nd Conf. on Experimental and Computational Method for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials. Prague: Czech Technical University, 2008, vol. 1, p. 225-232. ISBN 978-80-01-04184-0.
- Vimmrová, A., Svoboda, L.: Kyselé činidlo pro přípravu pěnové sádrové hmoty. In Construmat 2008. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2008, s. 1-5. ISBN 978-80-214-3660-2.