

Využití odpadního materiálu z výroby minerální vlny do stavebních materiálů a produktů

Ivana Chromková, Pavel Leber, Petr Bibora, Jiří Junek, Michal Frank

Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Hněvkovského 65, 617 00 Brno,

**e-mail: chromkova@vustah.cz, leber@vustah.cz, bibora@vustah.cz,
junek@vustah.cz, frank@vustah.cz**

**tel.: +420 730 519 708, +420 602 719 079, +420 725 395 351, +420 602 523 753,
+420 724 912 991**

Souhrn

Příspěvek přináší souhrn informací získaných v průběhu výzkumu možnosti využití tuhých odpadních materiálů z výroby minerální vlny do různých typů běžně vyráběných stavebních materiálů. Cílem bylo ověřit nejvhodnější způsob zpracování odpadních materiálů a určit maximální hodnoty jejich přídavku do konkrétního stavebního materiálu. Základním aspektem hodnocení bylo získání stavebního výrobku požadovaných fyzikálně-mechanických a ekologických vlastností dle příslušných norem a platných nařízení.

Klíčová slova: odpad, minerální vlna, minerální vlákna, granálie, beton, stavební materiál, izolační desky, samonivelační směs

Charakteristika odpadu

Výroba minerální izolační vlny je značně energeticky náročná, a proto se výrobci tohoto výrobku snaží o co největší možnou návratnost nestandardních výrobků zpět k přepracování. V posledních letech k tomu využívají technologii tzv. briketování. Jedná se o energeticky náročnou operaci splňující spíše ekologické aspekty než ekonomický přínos do společnosti. Do procesu briketování jsou zahrnuty téměř všechny odpady, které vznikají ve výrobě minerální izolační vlny. Jedná se o suchý, ale i mokrý materiál, který se pojí cementem a dalšími surovinami a tvaruje do podoby briket (viz Obr. 1). Možnosti využití takto upraveného odpadu bez nutnosti vložení další drahé energie je pro každou společnost zajímavá.

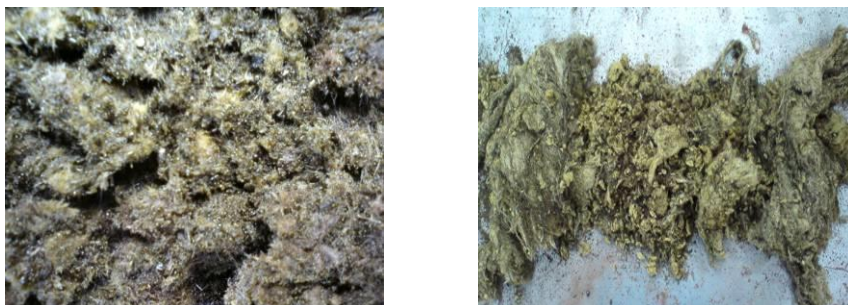


Obr. 1: Zpětný produkt vracející se do tavící lázně - brikety

Odpad z výroby kamenné minerální izolační vlny, který vzniká před vytvrzovací komorou zpod rozvlákňovacího stroje (viz Obr. 2) je tvořen dvěma složkami, a to nestejnorodými chomáči minerální vlny (různé velikosti, tvarů a vzájemného propojení) a minerálního písku,

který obsahuje větší či menší částice – granálie vytvořené z čedičového skla [1]. Podobně tomu vzniká také určitý odpad z výroby skelné minerální vlny před vytvrzovací komorou (viz Obr. 3), ovšem vzhledem k použité technologii téměř neobsahuje granálie.

Podle technologického zařízení použitého pro sběr a úpravu tohoto odpadu, je odpad ve formě suché nebo vlhké.



Obr. 2: Odpad z výroby kamenné minerální izolační vlny z pod rozvlákňovacího stroje



Obr. 3: Odpad z výroby skelné minerální izolační vlny z pod rozvlákňovacího stroje

Další odpady z výroby kamenné i skelné minerální vlny vznikají už za vytvrzovací komorou. Jsou to převážně ořezy z pásu (viz Obr. 4), případně výrobky, které neodpovídají výsledným technickým podmínkám. Tyto odpady jsou tvořeny hlavně kamennou nebo skelnou minerální vlnou a obsahují již velmi málo granálií.

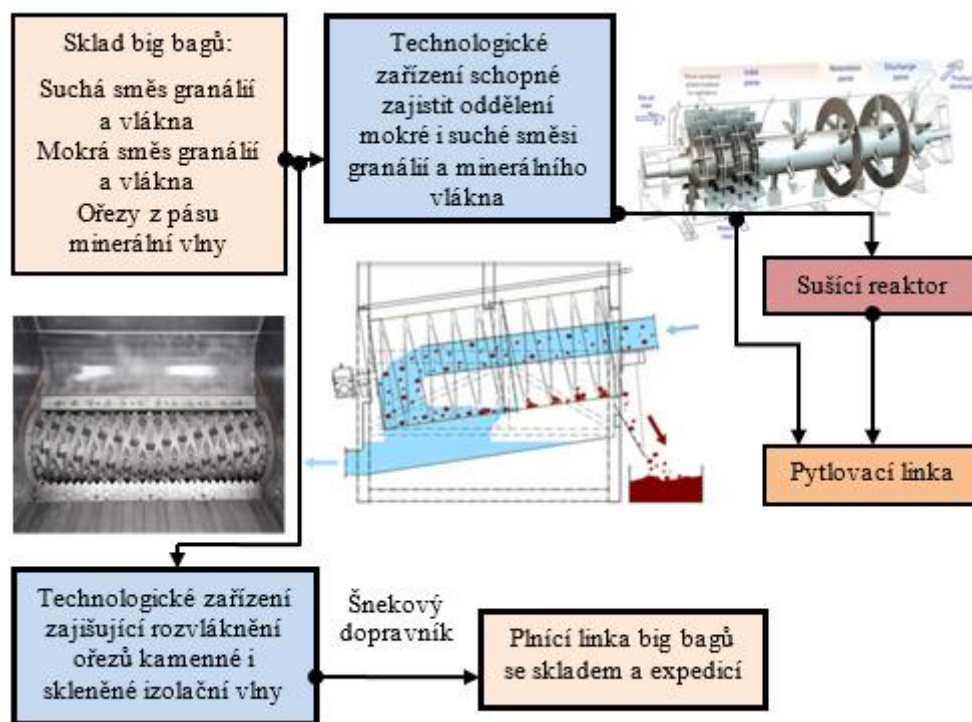


Obr. 4: Příklad odpadu z výroby minerální izolační vlny vzniklé za vytvrzovací komorou

Úprava odpadního materiálu

Vzorky směsných odpadů z výroby minerálních izolací získané od různých producentů byly pro další využívání od sebe odseparovány a upraveny na vyvinuté strojně-technologické lince (viz Obr. 5) do podoby požadované pro jejich další využití.

Tato strojně-technologická linka vznikla na základě řešení výzkumného projektu a v jeho průběhu byla postupně optimalizována.



Obr. 5: Technologická linka na úpravu odpadu z výroby minerální vlny

V technologické lince prochází odpadní materiál dílčími procesy:

- rozvláknění a rozčesání odpadu minerální izolační vlny
- separace minerální vlny na minerální vlákno a granálie
- sušení vlhkého odpadu při technologické úpravě
- třídění granulí podle velikosti zrn nad a pod 1 mm
- doprava materiálu po technologické lince
- způsob balení nově získané suroviny s ohledem na možnou přepravu mimo
- technologickou linku

Na Obr. 6 je patrné, jak se směsný vzorek změnil úpravou v strojně-technologické lince na minerální vlákno a granálie.



Obr. 6: Úprava směsného odpadu minerální vlny (vlevo) na minerální vlákno a granálie

Směry ověřování vhodného využití odpadní vlny a granálií

Řešení projektu bylo rozděleno do několika okruhů, které měly za úkol ověřit vhodnost využití upravené odpadní vlny a granálií. Ověřovány byly možnosti využití do stavebních hmot typu:

- samonivelační směsi
- tenkostěnné vláknobetonové prvky
- tenkovrstvé betonové tvarovky
- tepelně izolační desky

Podle charakteristických vlastností, zjištěných při vstupních technologických zkouškách, byly určeny vhodné způsoby aplikace pro obě složky odpadu:

- Granálie byly vybrány jako vhodný odpadní materiál pro ověřování do stavebních hmot typu samonivelační směsi a tenkostěnné vláknobetonové prvky.
- Přečištěná minerální vlna byla ověřována při výrobě betonové směsi pro výrobu tenkostěnných tvarovek a tepelně izolačních desek.

Samonivelační směsi

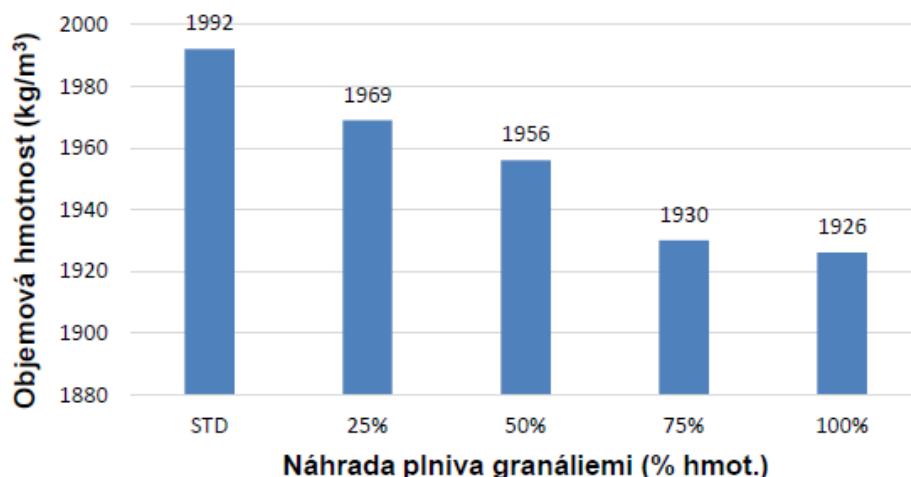
Suché podlahové směsi obecně obsahují velké množství chemických přísad za účelem dosažení vynikajících technologických vlastností čerstvé i zatvrdlé směsi. Proto jsou také pro výrobu suchých podlahových směsí používány přírodní suroviny nejvyšší kvality.

Z tohoto důvodu výrobci podlahových směsí minimálně využívají odpadních materiálů a druhotných surovin pro výrobu těchto stavebních produktů. Primárním úkolem technické části řešení tohoto okruhu projektu bylo vytvořit suchou podlahovou směs na cementové bázi, využívající odpad z výroby minerální vlny ve svém složení, která svými technologickými vlastnostmi splňuje požadavky přírodních norem a která je schopna konkurovat podlahovým směsím dostupným na trhu a to po technologické, ekologické i ekonomické stránce. Vyvíjená samonivelační podlahová směs na cementové bázi musí být vhodná k aplikaci jako vrstva vytápěných podlah v občanské a bytové výstavbě, které nejsou namáhané na ohrus a musí vyhovět požadavkům normy ČSN EN 13813.

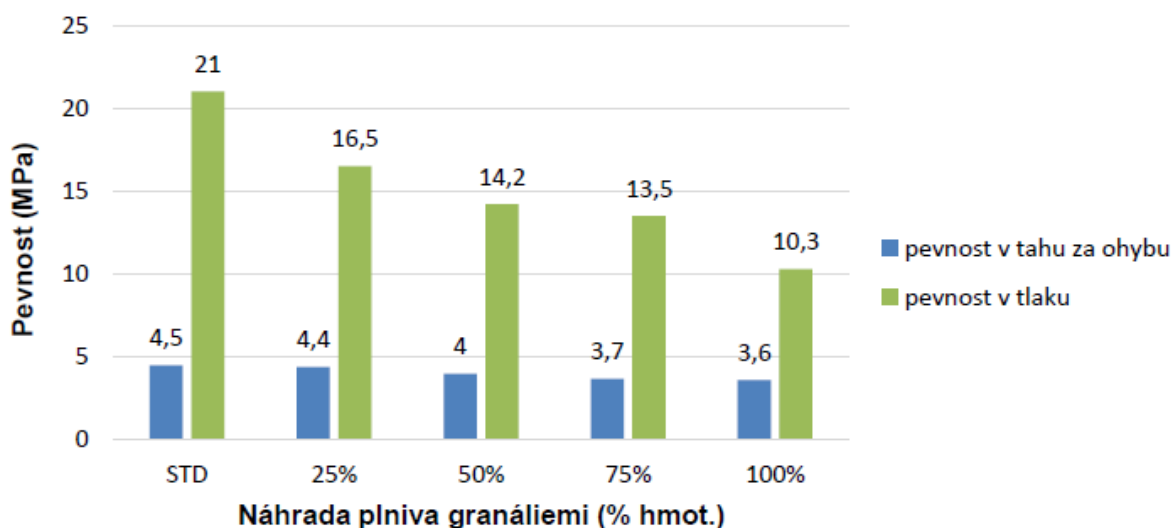
V ověřovaných recepturách bylo přírodní plnivo ve směsi nahrazováno odpadem z výroby minerální vlny v rozmezí 25 %, 50 %, 75 % a 100 % hmotnosti plniva. Jako pojivo byl použit cement pevnostní třídy 42,5 R a hlinitanový cement pro rychlý nárůst počátečních pevností. Jako plnivo byl použit jemnozrnný křemičitý písek frakce 0,065 – 0,50 mm, který byl postupně částečně až zcela nahrazován upravenými granáliemi v rozmezí 0 % - 100 % hmotnostních. Plnivo bylo doplněno ještě o další jemnozrnnou složku a to jemně mletý vápenec. Celkově se ověřované receptury skládaly z jedenácti složek, z nichž větší část tvořily použité chemické přísady a příměsi, jejichž vhodností jsme se rovněž zabývali během předchozích fází vývoje, jelikož jsou tyto chemické přísady nezbytné pro dosažení požadovaných vlastností směsi.

Základními vlastnostmi posuzovanými u samonivelačních směsí jsou především pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, objemová hmotnost, tepelná vodivost.

Z grafu (viz Obr. 7) je patný vliv výše přídatku granálií do suché směsi na pokles objemové hmotnosti výsledné hmoty. Z následujícího grafu (viz Obr. 8) pak je zřejmý vliv výše přídatku granálií do samonivelační směsi i na její výsledné pevnostní charakteristiky.



Obr. 7: Objemová hmotnost směsí (po 28 dnech) v závislosti na obsahu granálií



Obr. 8: Pevnost směsí v závislosti na obsahu granálií po 28 dnech zrání

V rámci laboratorních zkoušek byly jako dostačující vyhodnoceny pevnosti zkušebních těles s náhradou plniva granáliemi do max. 50 %. Jako optimální se pak jeví hodnoty pevností zkušebních těles s 25% náhradou plniva granáliemi. Pevnosti v tahu za ohybu v obou případech splňují požadavek na stanovený limit 4 MPa. V případě pevností v tlaku sice nebylo v případě 25% a 50% náhrady dosaženo požadovaných 20 MPa, uvedené pevnosti však nebyly konečné. Bylo možné je dále navýšit například snížením množství záměsové vody, tak aby bylo ještě dosaženo požadovaného rozlití (konzistence) čerstvé směsi a aby zároveň došlo k navýšení pevnosti v tlaku. Stejně tak vedlo k navýšení výsledných pevností v tlaku použití cementu vyšší pevnostní třídy.

Výsledky laboratorního testování byly s úspěchem ověřeny v konkrétní firmě, jejíž výroba je zaměřena na produkci suchých směsí. Při výrobě prototypu navržené samonivelační směsi došlo k navýšení pevností směsí vlivem použité výrobní technologie, která umožňuje intenzivnější homogenizaci vstupních složek. Výsledky pevnostních charakteristik takto vyrobené směsi byly výborné – normou požadované hodnoty pevností, jak v tahu za ohybu (4 MPa), tak v tlaku (20 MPa), byly splněny.

Tenkostěnné vláknobetonové prvky

Pro laboratorní ověření byly navrženy receptury vláknobetonové směsi vhodné pro technologii Premix s obsahem 10, 30, 60, 70, 80, 90, 100 % hmotnostních granálií, které tvořily hmotnostní náhradu slévarenského písku ze standardní betonové směsi. Byly navrženy a připraveny receptury vláknobetonu, které splňovaly požadavky a obecná kritéria pro lité směsi.

Ze zkušebních tenkostěnných vláknobetonových desek byly připraveny soubory vzorků, které byly použity pro zjištění základních fyzikálně mechanických vlastností po 28 dnech zrání. Finální vlastnosti tohoto typu kompozitu jsou určeny především pevností v tahu za ohybu, pevností v rázu, objemovou hmotností, nasákavostí a mrazuvzdorností.

Na základě výsledků laboratorních zkoušek navržených receptur byla vybrána a poloprovozně ověřována 80% náhrada písku granáliemi. Tato receptura vykazovala nejlepší vlastnosti. Výsledky zkoušek vlastností vláknobetonových prvků vyrobených při poloprovozní výrobě jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.

Tab. 1: Přehled dosažených vlastností vláknobetonových prvků (po 28 dnech zrání)

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Objemová hmotnost	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2130
Nasákavost	%	8,0
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	13,8
Pevnost v rázu IZOD	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	9,3
Index mrazuvzdornosti	—	1,2

Z tenkostěnných desek vyrobených při poloprovozní zkoušce byla připravena sada těles také pro stanovení zkoušky mrazuvzdornosti a pro urychlenou zkoušku trvanlivosti, která je prováděna podle metodiky vypracované Výzkumným ústavem stavebních hmot, a.s. (popsána v podnikové normě PZN ZKM 13_93 Urychlená zkouška trvanlivosti povrchových uprav vlnovek). Výsledky těchto stanovení jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

Tab. 2: Hodnoty sledovaných parametrů po trvanlivostních zkouškách

Vlastnost	Jednotka	Hodnota po 100 cyklech zmrazování	Hodnota po urychlené zkoušce trvanlivosti (simulující dobu 45 let)
Objemová hmotnost	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2175	2145
Nasákavost	%	6,9	6,3
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	16,4	16,7
Pevnost v rázu IZOD	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	7,0	6,8

Z výsledků zkoušky mrazuvzdornosti je patrné, že hodnoty objemové hmotnosti vzrostly (v logické návaznosti na pokračující zrání cementové matrice) a s nárůstem objemové hmotnosti koresponduje pokles nasákavosti. Vyšší objemová hmotnost a nižší nasákavost ukazují na kompaktnější strukturu materiálu. Pevnost v tahu za ohybu vzrostla úměrně se zráním matrice i vlivem zmrazovacích cyklů. Pevnost v rázu sklovláknobetonu se zráním cementové matrice klesá, vlivem zmrazování však klesla minimálně.

Vyhodnocením výsledků urychlené zkoušky trvanlivosti, která simuluje působení povětrnostních vlivů na vláknobetonový prvek v řádu let (zde konkrétně bylo provedeno

45 cyklů = simulace 45 let), je možno konstatovat, že se hmota chovala obdobně jako při zkoušce mrazuvzdornosti. Tedy vzrostly hodnoty objemové hmotnosti a současně pevnost v tahu za ohybu v důsledku zrání cementové matrice, naopak klesla nasákavost a pevnost v rázu.

Hodnoty všech sledovaných vlastností i po trvanlivostních zkouškách odpovídají hodnotám požadovaným od tohoto typu stavebního materiálu.

Tenkvrstvé betonové tvarovky

Pro ověřování využitelnosti odpadních vláken pro výrobu betonových tvarovek byl zvolen způsob, kdy byl sledován přírůstek odpadního skelného a čedičového vlákna do standardní betonové směsi, která splňovala parametry zavlhklé betonové směsi určené pro výrobu vibrolisovaných tvarovek [4, 5]. Přírůstek vlákna činil 25, 50, 75 a 100 % objemových. Posuzován byl vliv na chování čerstvé směsi, zpracovatelnost i výsledné vlastnosti tohoto betonu.

U betonů s přírůstkem obou typů minerálního vlákna došlo v závislosti na zvyšujícím se přírůstkem vlákna do hmoty k poklesu objemové hmotnosti a současně k nárůstu nasákavosti betonu.

Se vzrůstajícím obsahem čedičového vlákna ve hmotě došlo ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu betonu, a to až do výše 100% přírůstku vlákna. Ve srovnání se standardním betonem vykazovaly nejlepší hodnoty pevnosti v tlaku zkušební vzorky s obsahem 25 a 50 % (objemových) minerálního vlákna.

V případě betonů s obsahem skelného vlákna byl zaznamenán mírný nárůst pevností v tahu za ohybu hmoty s 25%, resp. 50% přírůstkem skelného vlákna. Vyšší množství vláken ve hmotě již nemělo na zvyšování pevností v tahu za ohybu žádný vliv, naměřené hodnoty betonu se 75% přírůstkem skelného vlákna byly srovnatelné se standardem. Pevnosti v tlaku betonů s obsahem skelného vlákna byly ve všech případech nižší než u standardního betonu.

U betonů s obsahem obou typů vláken byly provedeny i testy mrazuvzdornosti. Z nich vyplynulo, že vlivem působení mrazu došlo k poklesu pevností, a to u všech receptur betonů. Pevnosti betonů s obsahem skelných i čedičových vláken dosahovaly po zkoušce mrazuvzdornosti srovnatelné hodnoty.

Dále byl ověřován vliv přírůstku vlákna na průsak tlakovou vodou. Bylo zjištěno, že s rostoucím množstvím minerálního vlákna v betonové hmotě dochází k nárůstu průniku tlakové vody do betonu a k poklesu pevností v příčném tahu přímo úměrně k výši přírůstku vlákna do hmoty.

Přírůstek minerálního vlákna do betonové hmoty pro výrobu vibrolisovaných tvarovek působí pozitivně na tepelně-izolační vlastnosti hmoty. Ve srovnání s hodnotami naměřenými na standardní receptuře (bez vlákna) byly na vzorcích betonu s obsahem vlákna naměřeny nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti, měrné objemové kapacity i součinitele teplotní vodivosti (např. při 100% přírůstku čedičového vlákna do hmoty byla naměřena hodnota $\lambda=1,859 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). U betonů s obsahem vlákna skelného byl rozdíl hodnot tepelné vodivosti ještě výraznější než při použití vláken čedičových (při 100% přírůstku skelného vlákna $\lambda=1,226 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Této vlastnosti by mohlo být využito pro výrobu tvarovek pro příčkové zdivo.

Přehled vybraných výsledků laboratorního testování betonů s obsahem odpadního vlákna je uveden v tabulce Tab. 3.

Tab. 3: Přehled vlastností vybraných receptur s obsahem odpadního vlákna (po 28 dnech zrání)

Vlastnost	Jednotka	Beton - standardní receptura (bez vlákna)	Beton s obsahem vlákna			
			Čedičové vlákno		Skelné vlákno	
		0 % obj.	25 % obj.	50 % obj.	25 % obj.	50 % obj.
Objemová hmotnost	kg·m ⁻³	2290	2250	2240	2245	2220
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	5,43	6,41	6,54	6,2	5,9
Pevnost v tlaku	MPa	46,31	44,49	44,74	42,33	40,5
Pevnost v příčném tahu	MPa	2,25	3,05	2,52	2,88	1,92
Nasákavost	%	4,97	5,46	5,70	6,0	6,8
Průsak tlakovou vodou	mm	31,75	42,4	41,9	83,0	89,9
Součinitel tepelné vodivosti λ	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	2,167	2,117	1,972	2,037	1,710

Výsledky laboratorních zkoušek byly ověřovány v reálných podmínkách výrobního závodu, kde proběhla výroba betonových tvarovek se skelným i čedičovým vláknem. Při ověřování odpadního vlákna v reálné výrobě byl sledován vliv vlákna na rychlost a způsob homogenizace, na proces formování výrobků, vzhled výrobků po odformování a na výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti výrobků.

Přehled základních sledovaných parametrů stanovených na tvárnicih po 90 dnech od výroby je uveden v tabulce Tab. 4.

Tab. 4: Základní parametry bednicích tvarovek po 90 dnech zrání

Základní technické parametry	Jednotka	Standard tvárnice bez vlákna	Čedičové vlákno		Skelné vlákno	
			25 %	50 %	25 %	50 %
Rozměry	mm	510 × 300 × 195				
Objemová hmotnost	kg·m ⁻³	710	730	730	715	700
Hmotnost prvku	kg	20,3	20,9	20,5	20,3	19,9
Pevnost v tlaku	MPa	6,0	6,5	7,0	6,3	5,7

Z výsledků laboratorního ověřování i provedených provozních zkoušek lze konstatovat, že využití odpadu z výroby skelných vláken pro vibrolisované výrobky je možné. Pro výrobu betonových tvarovek ztraceného bednění se jako optimální jeví dávka přídavku vláken do

betonové hmoty v rozmezí 0 - 50 % objemových. Vyšší přídavky vlákna by byly vhodné do betonových směsí pro výrobu příčkových tvárníc.

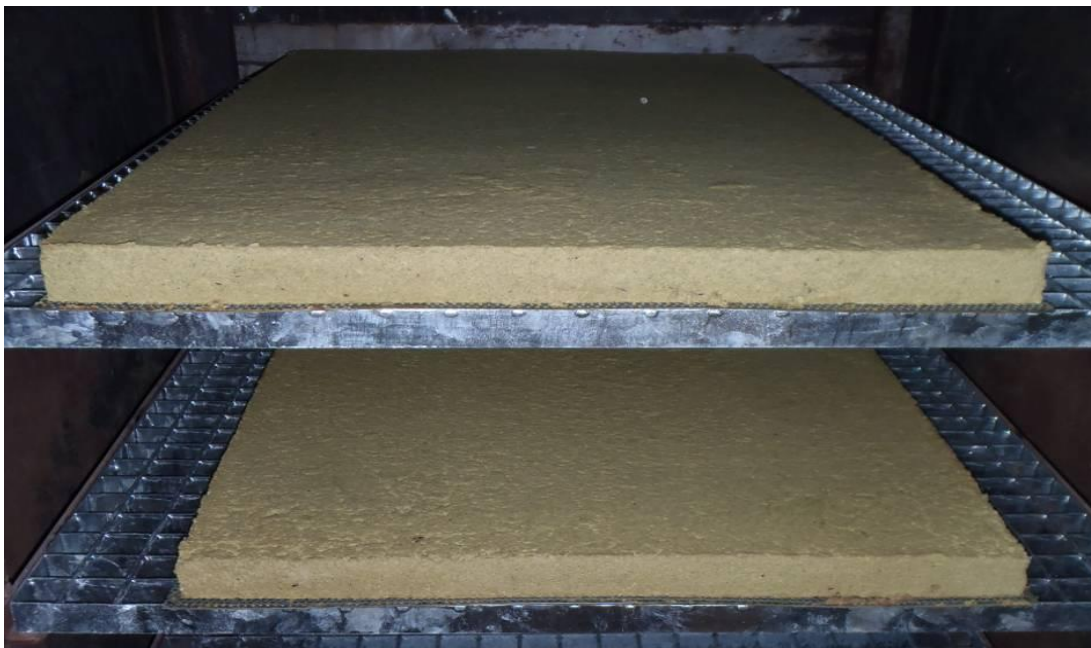
Tepelně izolační desky

Pro ověřování využitelnosti odpadního vlákna pro tento typ aplikace bylo nejvíce používáno minerální vlákno vzniklé rozvlákněním desek ISOVER.

Pro výrobu tepelně izolačních desek byly použity tři suroviny – vlákno, pojivo a voda.

Jako pojivo bylo při laboratorním ověřování používáno cementové mléko, vodní sklo a Solvarin AK (termicky modifikovaný kukuřičný škrob). Solvarin AK byl vyhodnocen jako nejvhodnější typ pojiva pro tuto aplikaci a poloprovozní ověřování již probíhalo pouze s tímto pojivem.

Při výrobě desek se jednotlivé komponenty směsi homogenizovaly v míchacím zařízení po přesně stanovenou dobu. Zhomogenizovaná směs pak byla uložena do speciálního zařízení, ve kterém byla hmota odvodněna a poté kompakována. Lisování probíhalo definovaným tlakem 10 MPa. Po vyrobení byly vláknité izolační desky sušeny při 80 °C.



Obrázek 9: Tepelně izolační desky po vyrobení

Z takto vyrobených desek byly připraveny zkušební vzorky. Velikost vzorků pro zkoušky tepelně technických vlastností byla 200 × 200 × 40 mm, pro zkoušky fyzikálně mechanických vlastností pak 250 × 150 × 40 mm. Výsledky zkoušek vlastností charakterizujících tepelně-izolační desky jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tabulka č. 5: Typické vlastnosti tepelně izolačních desek

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Rozměry (délka x šířka)	mm	1000 x 600
Tloušťka	mm	20 - 200
Objemová hmotnost	kg·m ⁻³	290 - 330
Pevnost v ohybu	MPa	280 - 320

Součinitel tepelné vodivosti λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,050
Objemová tepelná kapacita C_p	$10^6 \cdot J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	0,270
Součinitel teplotní vodivosti a	$10^{-6} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	0,220

V rámci provedených provozních zkoušek byly úspěšně ověřeny a zhodnoceny všechny dosud získané poznatky a zkušenosti z výzkumu a vývoje technologie tepelně izolačních desek a potvrdila se vhodnost vybraného pojiva i dodávaného vlákna a jeho úpravy pro použití v dané technologii.

Závěr

V průběhu řešení projektu bylo získáno velké množství poznatků o chování odpadního vlákna z výroby minerální vlny po jeho zapracování do hmoty a současně o tom, jaký vliv má obsah vlákna ve hmotě na chování a vlastnosti výsledného stavebního materiálu.

Jednotlivé provozní zkoušky ověřily vhodnost technologie výroby ve všech zamýšlených směrech s různým procentem přídavku či náhrady upravených odpadních materiálů z výroby skelné i kamenné minerální vlny v podobě granulí a minerálního vlákna. Byla tak potvrzena uplatnitelnost odpadního materiálu z výroby minerální vlny pro výrobu jiných stavebních hmot a výrobků.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci řešení projektu TA02021147 – Výzkum a vývoj optimálních environmentálně šetrných technologií pro nové a progresivní využití tuhých odpadních materiálů z výroby minerální vlny.

Literatura

- [1] BADALOVÁ, M.; DOBROVOLNÁ, J. Recyklace minerálních vláken z odpadů. 5. Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno 2003, s. 17-20. Dostupné z: <<http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/1-2/rp/badalova.pdf>>.
- [2] ČSN EN 13813. Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky. Praha: Český normalizační institut, listopad 2003. 28 s.
- [3] HELA, R. Technologie stavebních dílců. CERM, Brno 2001. 205 s. ISBN 80-214-1991-1.
- [4] ČSN EN 771-3. Specifikace zdících prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem. Praha: Český normalizační institut, listopad 2011. 40 s.
- [5] PZN ZKM 13_93. Urychlená zkouška trvanlivosti povrchových úprav vláknocementových vlnovek. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot,a.s., 1993. 5 s.