

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VÝVOJ ŽÁROVZDORNÝCH TMELŮ PRO KAMNÁŘSKOU TECHNOLOGII

Development of refractory mastics for stove fireclay technology

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN KOTÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. MARTIN KOTÁSEK
Název	Vývoj žárovzdorných tmelů pro kamnářskou technologii
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Hanykýř, V., Kutzendorfer, J. Technologie keramiky. vege 2001
[2] Tomšů, F., Palčo, Š. Žárovzdorné materiály IV. Netvarové žárovzdorné materiály. ČSVTS - Silikátová společnost ČR, 2009
[3] Kutzendorfer, J., Tomšů, F. Žárovzdorné materiály I. Základní pojmy, rodění, vlastnosti. ČSVTS - Silikátová společnost ČR, 2008.

Zásady pro vypracování

Žárovzdorné tmely na bázi keramicko (jíl) - chemické (vodní sklo) vazby jsou nezbytným materiálem pro konstrukci kamen, krbů apod. Při návrhu složení kamnářských tmelů je mimo jiné třeba zabezpečit jejich dlouhodobou trvanlivost v syrovém stavu (reologické vlastnosti) a přídržnost k lepeným materiálům (pórobeton, šamot). Cílem diplomové práce je inovovat složení kamnářského tmelu REGNATHERM z produkce firmy Seeif Ceramics v následujících bodech:

- nahrazení doposud používané neplastické složky tmelu (tabulární korund) levnější variantou (např. mletý pálený lupek) a posouzení vlivu této náhrady na sledované užitné vlastnosti tmelu (ČSN),
- nalezení optimálního obsahu vodního skla v tmelu především s ohledem na udržení vhodných reologických vlastností v čase a na sledované vlastnosti tmelu (pevnost spoje, žárovzdornost, klasifikační teplota).

Z pohledu technologie výroby navrhnete vhodnou provozní metodiku posuzování reologických vlastností tmelu, aby se vyloučilo doposud používané subjektivní hodnocení.

V teoretické části shrňte nejdůležitější vlastnosti žárovzdorných tmelů a metodiku jejich zkoušení.

Předepsané přílohy

.....
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Žárovzdorné tmely se používají na vytvoření kompaktních žárovzdorných vyzdívek nebo utěsňování spár. Tato práce se zabývá prodloužením trvanlivosti tmelu Regnaterm, úpravou jeho receptury a navržením vhodné metody posuzování reologických vlastností.

Klíčová slova

Tmel, žárovzdornost, konzistence, pevnost, trvanlivost, vodní sklo.

Abstract

Refractory mastics are used for making compact brickworks or for sealing up the joints. This thesis deals with lengthening of best before date of Regnaterm mastic, modification of recipe and suggestion of suitable method for evaluating reologic characteristics.

Key words

Mastic, refractory, consistency, strenght, durability, silicates.

Bibliografická citace VŠKP

KOTÁSEK, Martin. *Vývoj žárovzdorných tmelů pro kamnářskou technologii*. Brno, 2013. 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9.1. 2013

.....
podpis autora
Martin Kotásek

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Radomíru Sokoláři Ph.D. za pomoc, cenné rady a trpělivost.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce	11
3	Žárovzdorný tmel.....	12
3.1	Složení tmelů.....	12
3.1.1	Plniva	12
3.1.2	Pojiva	13
3.1.3	Přísady	13
3.2	Důležité vlastnosti a jejich zkoušení	13
3.2.1	Klasifikační teplota	13
3.2.2	Stanovení konzistence.....	13
3.2.3	Stabilita spoje.....	14
3.2.4	Pojivová schopnost (pevnost spoje v ohybu).....	14
3.2.5	Zrnitost (sítová analýza)	14
3.2.6	Žárovzdornost	14
3.2.7	Chemické složení	14
4	Řešený problém	15
5	Základní suroviny	16
5.1	Plniva.....	16
5.1.1	Písek tříděný 0 – 17	16
5.1.2	Křemen mletý ST9.....	17
5.1.3	Mikrosilika.....	17
5.1.4	Mleté korundové destičky	18
5.1.5	Plavený kaolín.....	19
5.2	Pojiva.....	19
5.2.1	Vodní sklo 36° - 38° Bé.....	19
5.2.2	Dietylglykol	19
5.3	Přísady.....	20
5.3.1	Lovosa TS20 (karboxymethylcelulóza).....	20
5.3.2	UZIN PE 260	20
6	Výroba a metodika měření.....	21
6.1	Výroba.....	21
6.2	Zkoušky na plastické směsi.....	21
6.3	Užitné vlastnosti tmelu.....	22
6.3.1	Klasifikační teplota	22
6.3.2	Pevnost spoje v ohybu	23
7	Nahrazení korundu.....	25

7.1	Referenční tmel	25
7.1.1	Receptura a vlastnosti	25
7.2	Odpadní písek z plavení kaolínu	26
7.2.1	Receptura a vlastnosti	27
7.3	Andaluzit – mullitový zlom	28
7.3.1	Receptura a vlastnosti	29
7.4	Andaluzitový zlom - mikro	29
7.4.1	Receptura a vlastnosti	30
7.5	Lupek B242 BS	31
7.5.1	Receptura a vlastnosti	32
7.6	Vyhodnocení	32
8	Prodloužení trvanlivosti	35
8.1	Úprava poměru vodní sklo:voda	35
8.1.1	90:10	36
8.1.2	80:20	37
8.1.3	70:30	39
8.1.4	60:40	40
8.1.5	50:50	42
8.1.6	Vyhodnocení	43
8.2	Vypuštění diethylglykolu a penetrační přísady	45
8.3	Tmel NT 1350	48
8.4	Reakce vodního skla s ostatními složkami	50
8.4.1	Vyhodnocení	50
8.5	Tmel bez mikrosiliky	53
8.6	Vyhodnocení	55
9	Suchá směs	57
9.1	Susil 3,3	57
9.2	Vyhodnocení	59
10	Inovace metodiky měření reologických vlastností	61
10.1	ISO 13765	61
10.2	Nenormované metody	62
11	Závěr	64
12	Seznam použité literatury	65
13	Seznam tabulek	67
14	Seznam grafů	69
15	Seznam obrázků	70

1 Úvod

Žárovzdorné malty a tmely se používají na vytvoření kompaktních žárovzdorných vyzdívek nebo utěsňování spár. Jsou to směsi jemnozrnných plniv, pojiv a dalších přísad. [1] [2]

I když v nyní platné normě nenajdeme pojem tmel, ale pouze malta, je stále důležité je od sebe odlišovat, k čemuž v běžné praxi dochází. Důležitá je hlavně zrnitost tmelů, běžně do 0,3 mm, umožňující širší oblast použití. Díky chemické vazbě navíc dosahují tmely vysoké mechanické pevnosti již krátce po aplikaci. [4]

Uplatnění žárovzdorných tmelů:

- Těsné zdění hutných nebo izolačních žárovzdorných tvarovek
- Zdění komínových tvarovek
- Spojování vláknitých bloků
- Jako nátěry vláknitých materiálů, kelímků pecí
- Těsnění spár, oprava trhlin

[5]

2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je inovace tmelu Regnaterm vyráběného firmou Seeif Ceramic, a.s., a to zejména udržení vhodných reologických vlastností v čase při zachování sledovaných vlastností tmelu (pevnost spoje, klasifikační teplota, žárovzdornost).

Díličními cíly jsou nahrazení doposud používaných neplastických surovin jinými, levnějšími a následné posouzení vlivu těchto náhrad na sledované vlastnosti tmelu a navržení vhodné metodiky pro posuzování reologických vlastností.

3 Žárovzdorný tmel

Norma ČSN EN 1402-1 platná od června roku 2004 již pojmy malta a tmel nerozlišuje a žárovzdorné malty definuje jako:

Materiály určené pro zdění a spárování cihel nebo tvarovek. Jsou to směsi jemných žárovzdorných kameniv a pojiv, dodávaného v suchém stavu, nebo smíšené s vodou a připravené pro použití. Jsou hlavní dva druhy malt:

- a) teplem tuhnoucí malty, tvrdnoucí za vyšší teploty vznikem keramické nebo chemické vazby;
- b) na vzduchu tuhnoucí malty, tvrdnoucí za teploty okolí vznikem chemické, nebo hydraulické vazby. [1]

,

Opačně je tomu v komerční sféře, kde se, na rozdíl od zkušebnictví, pojmy malta a tmel odlišují.

Rozdíl mezi tmelem a maltou je především v jejich zrnitosti. Zatímco malty běžně obsahují zrna velikosti až 1 mm, tmely jsou o poznání jemnější, do 0,3 mm, což umožňuje menší tloušťku spoje. [1]

Dále jsou tu vazby, u malt je nejčastěji vazba keramická, tmel je založen na chemické bázi. Oba materiály jsou dodávané buď jako suché směsi v pytlích nebo častěji v pastovitém stavu v PP vědrech. Zpracovatelnost tmelu by měla být alespoň 6 měsíců. [4]

3.1 Složení tmelů

3.1.1 Plniva

Plnivem jsou různé žárovzdorné práškové materiály, např. křemen, andaluzit, korund, lupek, mullit, bauxit. Kromě mineralogického složení se sleduje i granulometrie, měla by převažovat zrna do 0,2 mm. [1]

3.1.2 Pojiva

Podle procesu tuhnutí se pojiva dělí na hydraulická, keramická, chemická a organická. Při výrobě žárovzdorných tmelů se využívají pojiva chemická, především vodní sklo a fosforečná pojiva. [1]

3.1.3 Přísady

Látky urychlující tuhnutí, látky upravující reologické vlastnosti a látky prodlužující stabilitu spoje.

3.2 Důležité vlastnosti a jejich zkoušení

Podle ČSN 72 6100 se žárovzdorné tmely zkouší v České republice od roku 1990. Jedná se hlavně o stanovení délkových změn, klasifikační teploty a pevnosti spoje. V zahraničí se už ale několik let zkouší podle mezinárodní normy ISO 13765, která se ukázala mnohem bližší praxi. Lze předpokládat, že se tuzemští výrobci žárovzdorných materiálů brzy přikloní právě k této ISO normě, a to hlavně kvůli rostoucímu vývozu svých výrobků do zahraničí.

Tato norma popisuje postupy stanovení konzistence, stability spoje, pevnosti spoje v ohybu, zrnitosti a vlhkosti hotové malty.

3.2.1 Klasifikační teplota

ČSN 72 6100

Teplota, při níž hodnota délkových změn pálením nepřekročí dohodnutou hodnotu mezi dodavatelem a odběratelem (např. 1%). [6]

3.2.2 Stanovení konzistence

ISO 13765-1 metoda vtláčení kužele

Měření hloubky průniku zkušebního kužele do vzorku v mm. [7]

ISO 13765-2 na střešacím stole

Měření zvětšení průměru vzorku, který je namáhán vertikálním pohybem na střešacím stole. [8]

3.2.3 Stabilita spoje

ISO 13765-3

Čas, při kterém je možný pohyb dvou spojených cihel, aniž by došlo k porušení spoje v důsledku vyschnutí tmelu. [9]

3.2.4 Pojivová schopnost (pevnost spoje v ohybu)

ISO 13765-4

Maximální napětí, kterému odolá zkušební vzorek při tříbodovém ohybu. Podstatou zkoušky je spojení dvou zkušebních těles žárovzdorným tmelem a následné namáhání spoje tříbodovým ohybem. Výsledkem zkoušky je pevnost spoje v ohybu v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$. [10]

3.2.5 Zrnitost (sítová analýza)

ISO 13765-5

Udává se buď zbytek na síti, nebo rozmezí granulometrie. [11]

3.2.6 Žárovzdornost

EN 993-12

Schopnost materiálu odolávat vysokým teplotám. Indikací žárovzdornosti je ohnutí zkoušené a referenční žároměrky při určité teplotě. [12]

3.2.7 Chemické složení

EN 955-12

Procentuální obsah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve výrobku.

4 Řešený problém

Tmel Regnaterm je univerzální žárovzdorný tmel pro použití až do 1300 °C. Je určen především pro spojování vysoce savých a pórovitých žárovzdorných materiálů.

Hlavní problém spočívá v nedostatečné trvanlivosti, která nedosahuje požadovaných šesti měsíců. Tmel ve svém obalu krátce po vyrobení samovolně tuhne a ztrácí zpracovatelnost. Úkolem tedy bylo pokusit se tuto trvanlivost prodloužit a zároveň zachovat požadované vlastnosti: dobrá smáčivost a pojivová schopnost, zachování pastovité konzistence, minimální délkové změny.

Dalším úkolem bylo nahrazení korundu v receptuře levnější variantou a následné posouzení jejího vlivu na vlastnosti po výpalu.

Z hlediska technologie výroby bylo požadováno navržení vhodné metodiky zkoušení reologických vlastností místo doposud používaného subjektivního hodnocení.

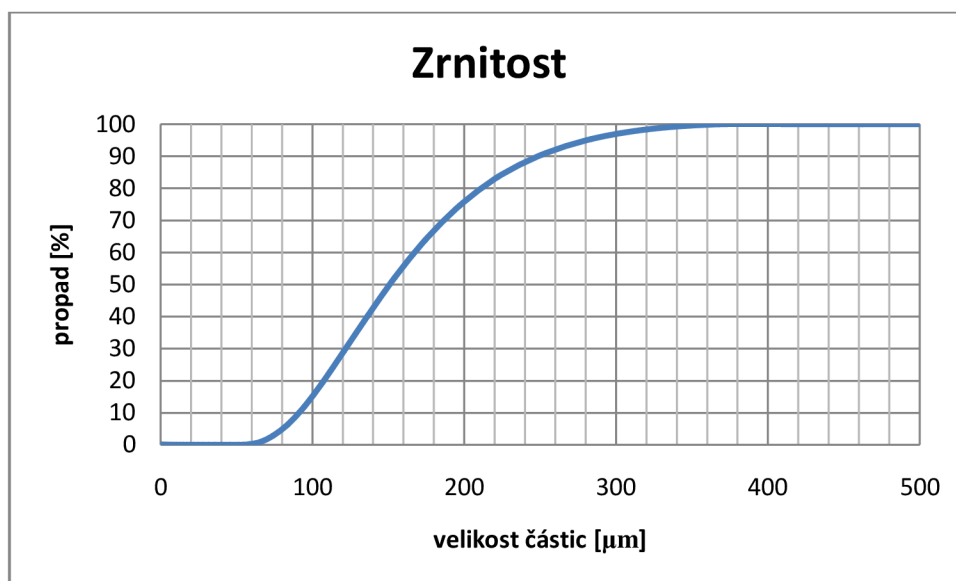
5 Základní suroviny

5.1 Plniva

Majoritní složka všech tmelů. Hlavními složkami plniv jsou Al_2O_3 a SiO_2 , zrnitost se pohybuje většinou do 0,3 mm, žárovzdornost jednotlivých surovin překračuje 1600 °C.

5.1.1 Písek tříděný 0 – 17

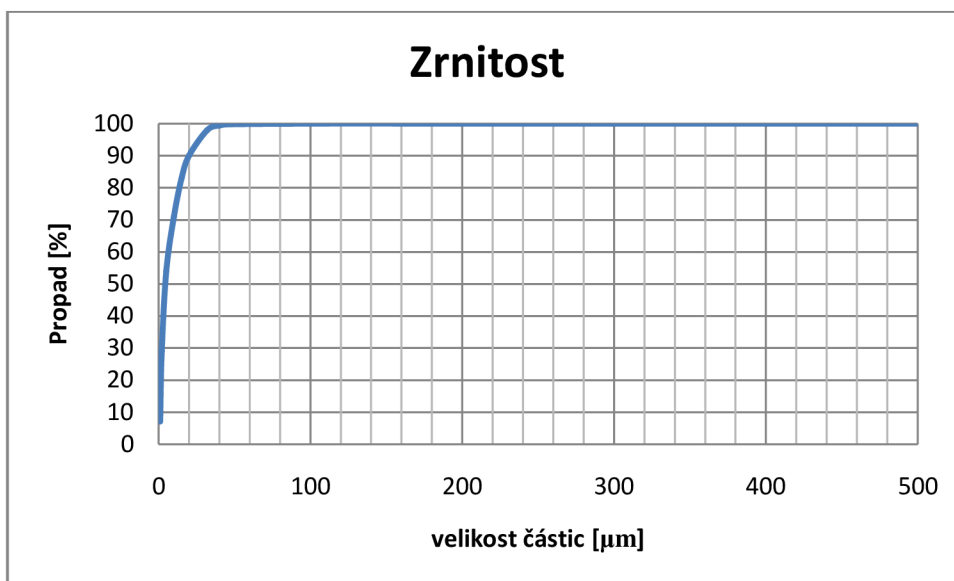
- Hlavní složka tmelu Regnaterm
- Obsah SiO_2 : 97 %
- Vlhkost: 5 %
- Sytná hmotnost volná: $880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Cena: 380 Kč/t



graf 5.1: křivka zrnitosti – písek tříděný 0 – 17

5.1.2 Křemen mletý ST9

- Nízká granulometrie – zlepšení zpracovatelnosti
- Obsah SiO₂: min. 99,6 %
- Vlhkost: 0,7 %
- Sypná hmotnost volná: 850 kg·m⁻³
- Cena: 8400 Kč/t

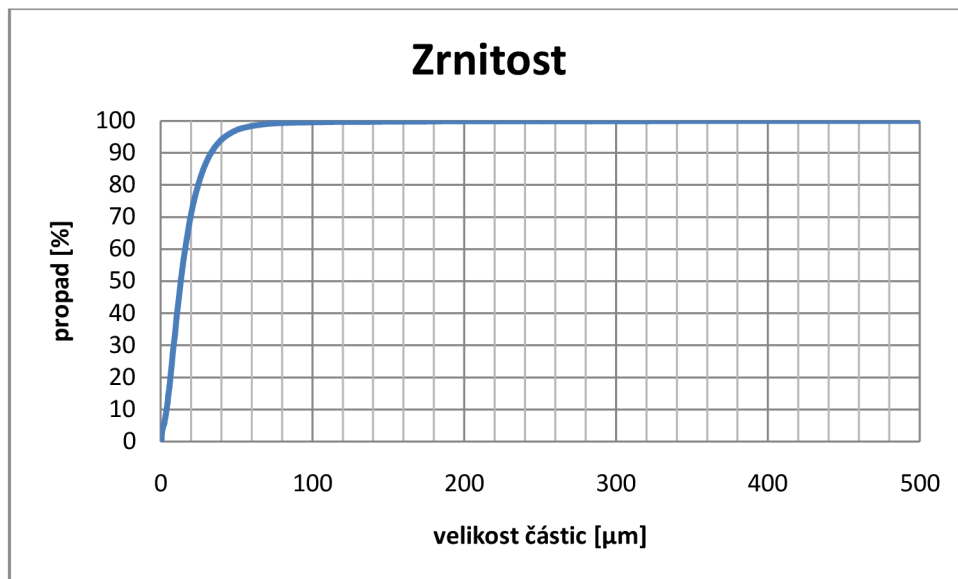


graf 5.2: křivka zrnitosti – Křemen mletý ST9

[15]

5.1.3 Mikrosilika

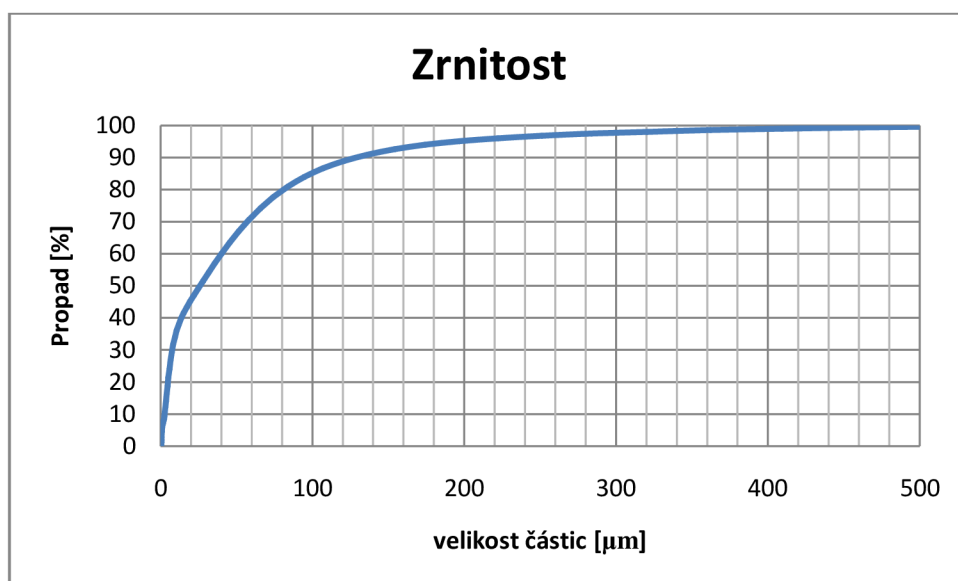
- Odpad z výroby ferosilicia – zlepšení roztíratelnosti a zvýšení pevnosti spoje
- Obsah SiO₂: min. 85 %
- Sypná hmotnost volná: 260 kg·m⁻³
- Vlhkost: 2,3 %
- Cena: 2350 Kč/t



graf 5.3: křivka zrnitosti – mikrosilika

5.1.4 Mleté korundové destičky

- Zvýšení žárovzdornosti
- Obsah Al_2O_3 : 92 %
- Synná hmotnost volná: $1380 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Vlhkost: 0,5 %
- Cena: 15 500 Kč/t



graf 5.4: křivka zrnitosti – mleté korundové destičky

5.1.5 Plavený kaolín

- Zlepšuje smáčivost tmelu, vytváří keramickou vazbu
- Obsah Al_2O_3 : 36,7
- Obsah SiO_2 : 47,6
- Vlhkost: 5,3 %
- Zrnitost: max. 0,05 % > 0,045 mm
- Cena: 1650 Kč/t

5.2 Pojiva

Tmel Regnaterm je založen na chemické vazbě vodního skla. Vodní sklo reaguje se vzdušným CO_2 a tvrdne. Díky této reakci dosahují tmely manipulačních pevností již krátce po použití. Přítomností kaolinu nebo jílu vzniká při vyšších teplotách také vazba keramická, která přispívá k pevnostem ve vyšších teplotách.

5.2.1 Vodní sklo 36° - 38° Bé

- Hustota: 1328 – 1352 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Obsah SiO_2 : 24,5 – 27,8 %
- Molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$: 3,2 – 3,5

[13]

5.2.2 Dietylenglykol

- Zvýšení počátečních pevností
- Hustota: 1114 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

5.3 Přísady

Používají se pro zlepšení užitných vlastností.

5.3.1 Lovosa TS20 (karboxymethylcelulóza)

- Plastifikátor, náhrada jílu
- Zpomalení procesu sedimentace – prodloužení doby použití
- Světlý práškový materiál

5.3.2 UZIN PE 260

- Disperzní penetrace
- Zabránění „vysychání“ tmelu po nanesení na lehčenou tvarovku
- Před použitím se ředí s vodou v poměru 1:2

6 Výroba a metodika měření

V této části bude popsán postup výroby tmelu a zkoušky na něm prováděné.

6.1 Výroba

Každá směs se vyráběla v množství 2 kg, což odpovídá asi 1 litru tmelu. Výrobní postup sestával z navážení jednotlivých surovin na vahách s přesností 0,01 g, homogenizace a míchání.

Homogenizace suché směsi probíhala v laboratorním homogenizátoru po dobu 15 minut. Po smíchání suché směsi s pojivy se vzniklá plastická směs míchala 6 minut v míchačce, následně byly ještě přidány přísady a míchání pokračovalo dalších 6 minut.

6.2 Zkoušky na plastické směsi

Po namíchání tmelu se provedla zkouška stanovení konzistence na střešacím stole podle ISO 13765-2. Následovala zkouška pomocí Vicatova přístroje s penetračním válečkem. Vzhledem k reologické povaze tmelu nešla změřit konečná hodnota poklesu, stanovila se tedy hloubka penetrace po 5 sekundách. Pro vyšší přesnost byl k Vicatově přístroji dodatečně připevněn digitální úchylkoměr s přesností 0,01 mm.



Obr. 6.1: Vicatův přístroj s digitálním úchylkoměrem

Bylo provedeno také subjektivní hodnocení konzistence pomocí cihly, na kterou se nanasla vrstva tmelu. Hodnotila se obtížnost nanášení, a zda tmel nestéká.

Po několika zkouškách se upustilo od stanovování konzistence na střešacím stolku, protože materiál je lepkavý a kompaktní a nedocházelo k téměř žádné změně průměru (jen cca 10 mm).

6.3 Užité vlastnosti tmelu

Po zhodnocení konzistence následovalo stanovení klasifikační teploty a pevnosti spoje.

6.3.1 Klasifikační teplota

Klasifikační teplota je důležitou hodnotou určující teplotu, při níž celkové délkové změny nepřekročily předem danou hodnotu.

Pro určení klasifikační teploty je postup popsán v ČSN 72 6100. Vychází z určení délkových změn pálením, které se provede několikrát okolo očekávané klasifikační teploty v pravidelných teplotních intervalech, zpravidla po 100 °C.

Pro výrobu zkušebních těles je zapotřebí žárovzdorná podložka, v tomto případě lehčená žárovzdorná tvarovka, na kterou se nanese 3 mm silná vrstva tmelu o ploše 120 x 60 mm. Do takto vytvořené vrstvy se posuvným měřítkem vtlačí značky vymezující počáteční délku $l_0 = 100$ mm. Po 24 hodinách putují zkušební tělesa nejdříve do sušárny a následně na výpal. Po výpalu se znovu změří vzdálenost mezi značkami (l_2) a hodnoty se dosadí do vzorce pro výpočet celkové délkové změny DC v %.

$$DC = \frac{(l_0 - l_2)}{l_0} \cdot 100$$

[6]

6.3.2 Pevnost spoje v ohybu

Pevnost spoje v ohybu je maximální napětí, kterému může odolat zkušební vzorek při třibodovém ohybu. Postup zkoušky je podrobně popsán v ISO 13765-4.

Pomocí tmelu se spojí dva předem připravené hranoly o rozměrech (57 x 40 x 40) mm. Pevnost spoje se stanovuje na vysušených i vypálených vzorcích zatěžováním třibodovým ohybem. Výsledek se vypočítá jako pevnost v ohybu σ_F , zaokrouhlená na 0,1 N·mm⁻² podle vzorce:

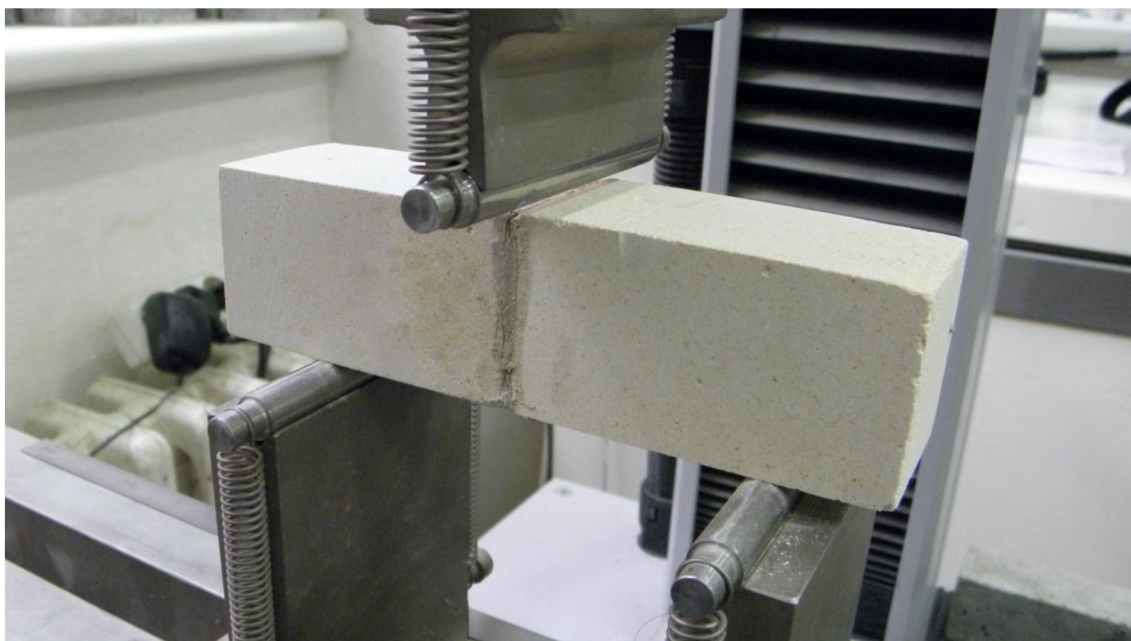
$$\sigma_F = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L_s}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

kde F_{max} je maximální síla působící na vzorek v N
 L_s vzdálenost podpor v mm
 b šířka vzorku ve spoji v mm
 h výška vzorku ve spoji v mm

[10]



Obr. 6.2: Pevnost spoje v ohybu – zkušební těleso



Obr. 6.3: Pevnost spoje v ohybu – třibodový ohyb

7 Nahrazení korundu

Mleté korundové destičky jsou nejdražší surovinou v receptuře, zároveň však nejvíc přispívají k žárovzdornosti a pevnostem po výpalu. Můžeme ho tedy nahradit jen částečně. Je přitom důležité také zachovat potřebnou granulometrii.

7.1 Referenční tmel

Jednotlivé receptury se liší od referenční pouze přidavkem materiálu, který z části nahrazuje korund. Dalším rozdílem je množství vody, její přidavek se volí podle potřebné konzistence.

7.1.1 Receptura a vlastnosti

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	17,5	350
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36-38 Bé	18	360
	Dietylglykol	0,9	18
	Voda	4,5 (2,0)*	90

Tab. 7.1: receptura – referenční tmel

* skutečné množství použité vody

Konzistence na střešacím stolku	ISO 13765-2	110 / 113 mm
Konzistence Vicat	-	21,554 mm
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,72 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	0,91 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	Min* 4,1 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu na 1100°C/3h	ISO 13765-4	Min* 3,8 N·mm ⁻²

Tab. 7.2: vlastnosti – referenční tmel

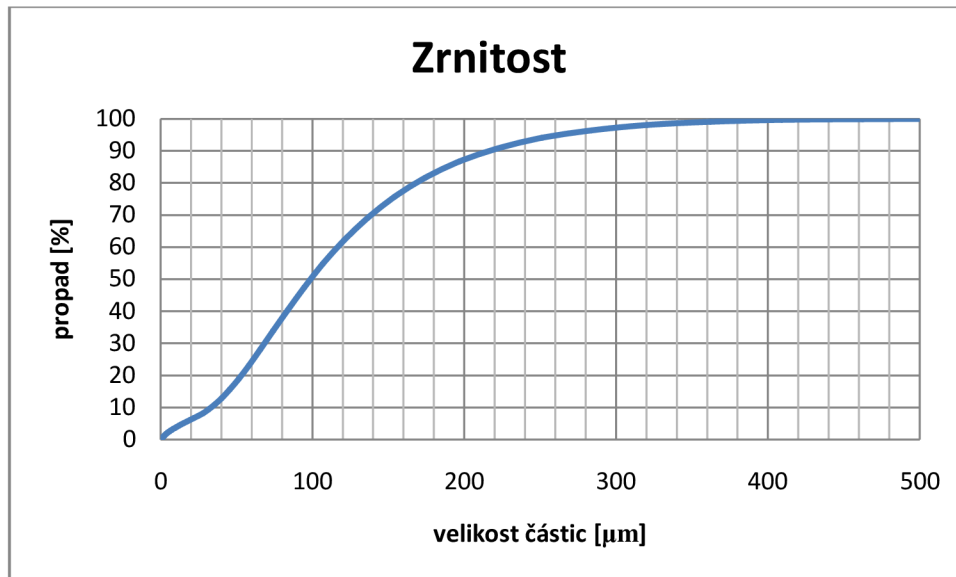
* K porušení nedošlo v tmelu, ale ve zkušební hranolu. Pevnost tmelu je tedy vyšší než materiál, pro který je určen.



Obr. 7.1: Porušení zkušebního tělesa mimo tmel

7.2 Odpadní písek z plavení kaolínu

- Sytná hmotnost: 990 kg·m⁻³
- Vlhkost: 0,3 %



Graf 7.1: křivka zrnitosti – odpadní písek z plavení kaolinu

7.2.1 Receptura a vlastnosti

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	7,5	150
	Odpadní písek	10,0	200
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36-38 Bé	18	360
	Dietylenglykol	0,9	18
	Voda	4,5 (2,0)	90

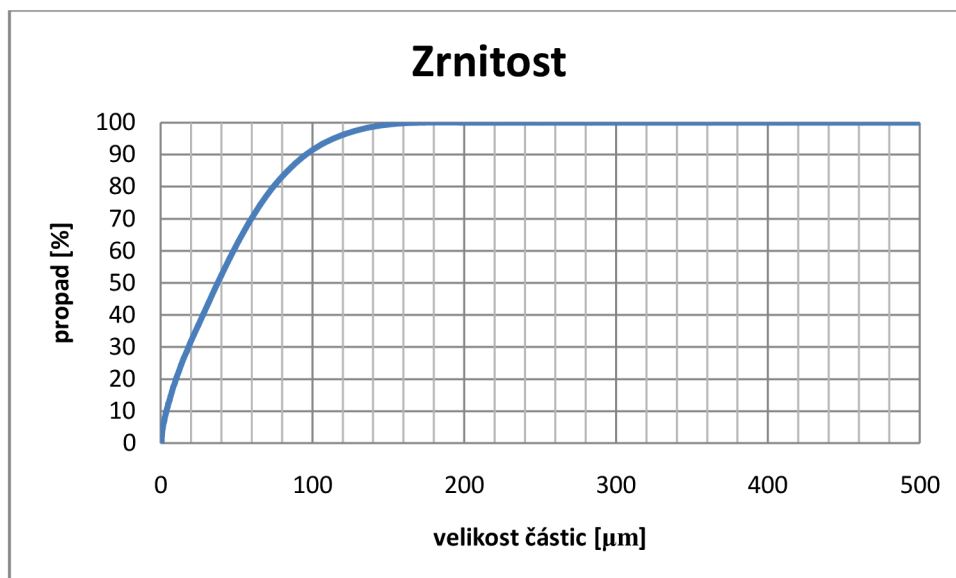
Tab. 7.3: receptura – tmel s odpadním pískem

Konzistence na střešacím stolku	ISO 13765-2	110 / 115 mm
Konzistence Vicat	-	18,770 mm
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,80 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	1,14 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	Min 5,0 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu na 1100°C/3h	ISO 13765-4	3,3 N·mm ⁻²

Tab. 7.4: vlastnosti – tmel s odpadním pískem

7.3 Andaluzit – mullitový zlom

- Sytná hmotnost: 940 kg·m⁻³
- Vlhkost: 0,2 %



Graf. 7.2: křivka zrnitosti – andalusit – mullitový zlom

7.3.1 Receptura a vlastnosti

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	7,5	150
	Andaluzit-mullit. zlom	10,0	200
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36-38 Bé	18	360
	Dietylenglykol	0,9	18
	Voda	4,5 (3,0)	90

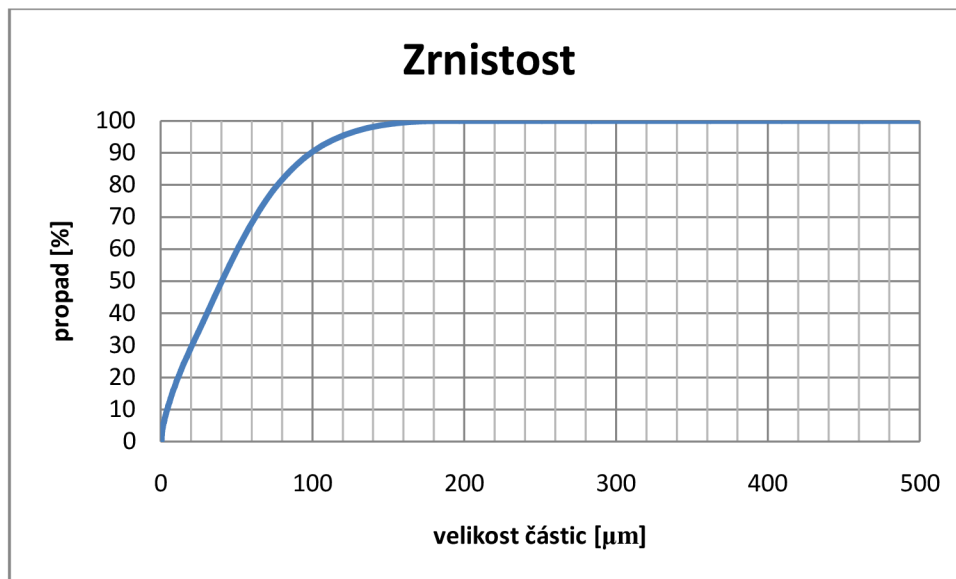
Tab. 7.5: receptura – tmel s andalusit – mullitovým zlomem

Konzistence na střešacím stolku	ISO 13765-2	107 / 116 mm
Konzistence Vicat	-	21,647 mm
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,22 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	0,54 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	Min 3,8 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu na 1100°C/3h	ISO 13765-4	3,5 N·mm ⁻²

Tab. 7.6: vlastnosti – tmel s andalusit – mullitovým zlomem

7.4 Andaluzitový zlom - mikro

- Sytná hmotnost: 1210 kg·m⁻³
- Vlhkost: 0,63 %



Graf 7.3: křivka zrnitosti – andalusitový zlom

7.4.1 Receptura a vlastnosti

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	7,5	150
	Andalusitový zlom	10,0	200
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36-38 Bé	18	360
	Dietylenglykol	0,9	18
	Voda	4,5 (3,0)	90

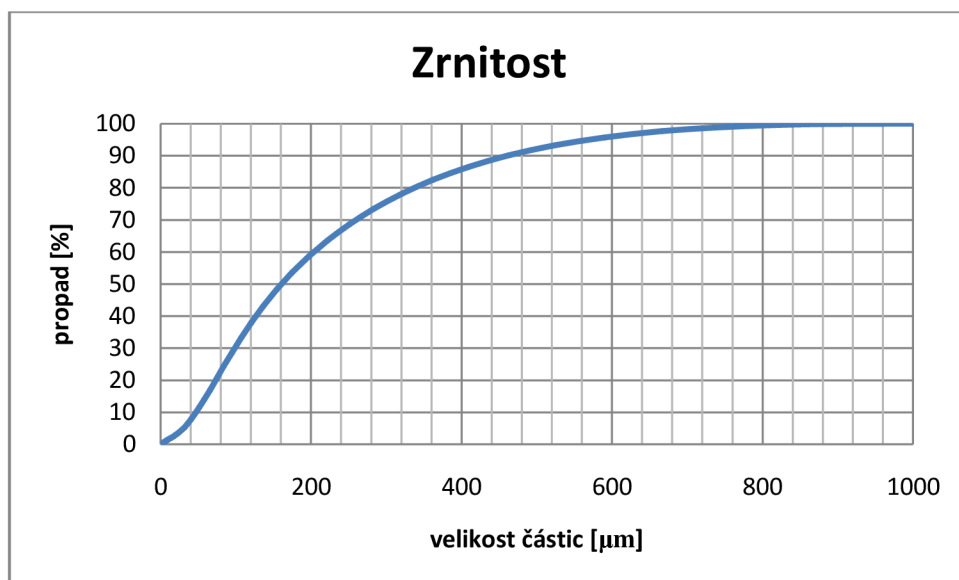
Tab. 7.7: receptura – tmel s andalusitovým zlomem

Konzistence na střešacím stolku	ISO 13765-2	109 / 105 mm
Konzistence Vicat	-	18,742 mm
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,54 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	0,77 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	Min 4,1 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu na 1100°C/3h	ISO 13765-4	3,2 N·mm ⁻²

Tab. 7.8: vlastnosti – tmel s andalusitovým zlomem

7.5 Lupek B242 BS

- Sytná hmotnost: 1180 kg·m⁻³
- Vlhkost: 0,34 %



Graf 7.4: křivka zrnitosti – lupek B242 BS

7.5.1 Receptura a vlastnosti

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	7,5	150
	Lupek B242 BS	10,0	200
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36-38 Bé	18	360
	Dietylenglykol	0,9	18
	Voda	4,5 (2,0)	90

Tab. 7.8: receptura – tmel s lupkem B242 BS

Konzistence na střešacím stolku	ISO 13765-2	105 / 112 mm
Konzistence Vicat	-	18,769 mm
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,32 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	0,62 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	3,5 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu na 1100°C/3h	ISO 13765-4	3,1 N·mm ⁻²

Tab. 7.9: vlastnosti – tmel s lupkem B242 BS

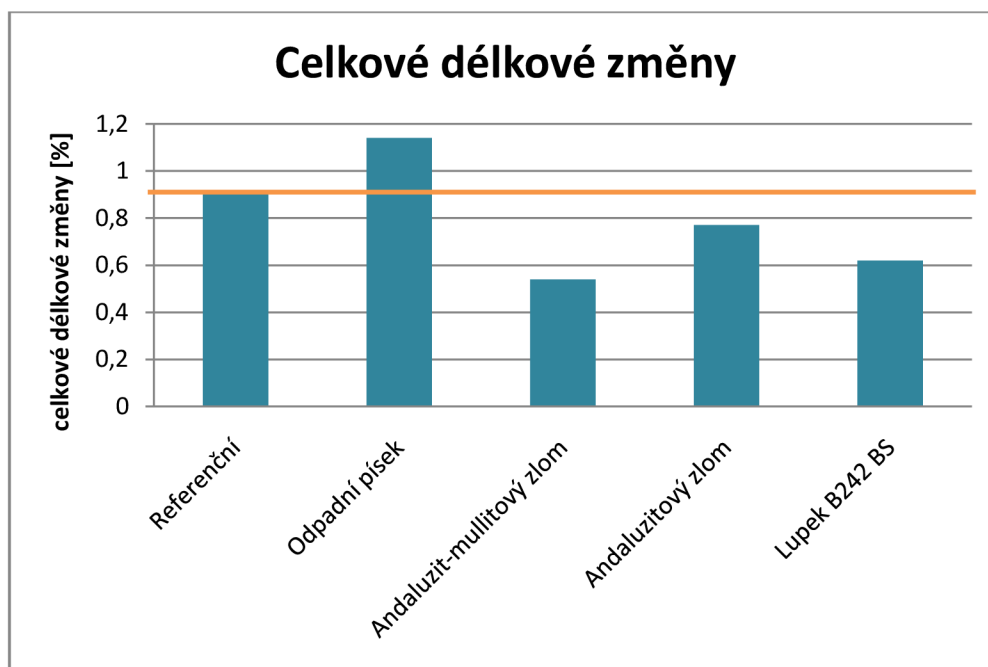
7.6 Vyhodnocení

Z hlediska zpracovatelnosti vyhovují všechny zkoušené suroviny. Byla nutná jen úprava množství vody, pravděpodobně proto, že některé alternativní materiály obsahují více jemných částic.

Shrnutí	Délkové změny sušením	Celkové délkové změny	Pevnost spoje po vysušení	Pevnost spoje po výpalu
	[%]	[%]	[N.mm ⁻²]	[N.mm ⁻²]
Referenční	0,72	0,91	4,1	3,8
Odpadní písek	0,8	1,14	5	3,3
Andaluzit-mullitový zlom	0,22	0,54	3,8	3,9
Andaluzitový zlom	0,54	0,77	4,1	3,2
Lupek B242 BS	0,32	0,62	3,5	3,1

Tab. 7.10: shrnutí vlastností tmelů

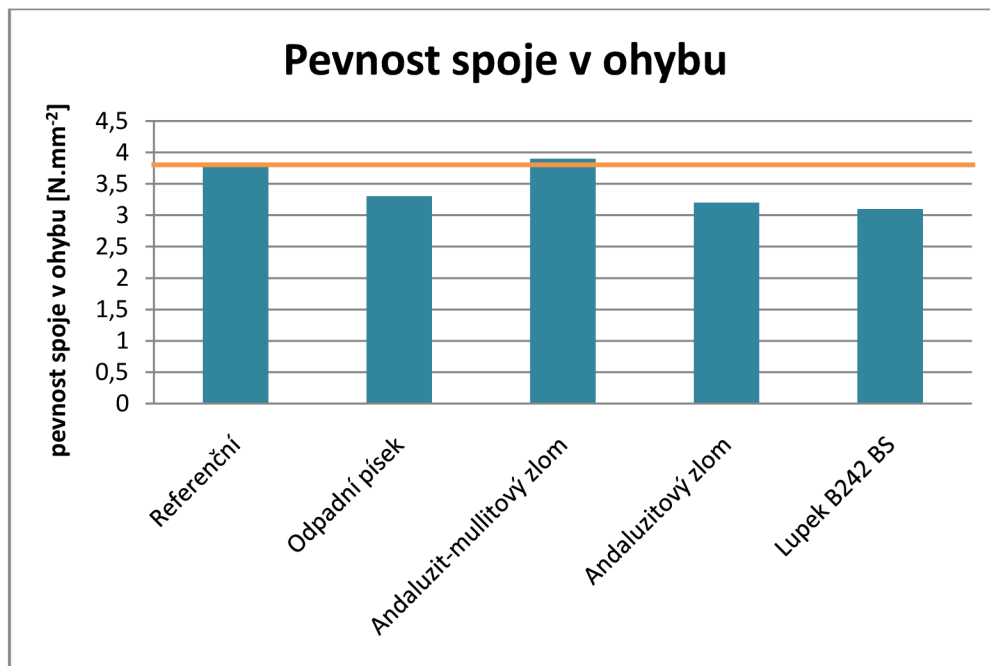
Co se týká délkových změn, tam nedošlo ke zlepšení (menší smrštění) oproti referenčnímu vzorku jen u odpadního písku z plavení kaolinu. Může to být způsobeno zvýšenou přítomností jílových minerálů z kaolinu. S výjimkou odpadního písku z plavení kaolinu jsou tedy všechny ostatní suroviny z hlediska délkových změn vhodné pro náhradu mletých korundových destiček.



Graf 7.5: porovnání tmelů – celkové délkové změny

Pevnosti po vysušení jsou neporovnatelné, protože k porušení vždy došlo ve zkušebním hranolu místo ve spáře. Rozdíly ve výsledných pevnostech

uvedených v tabulce jsou způsobeny rozptylem pevností lehčených šamotových tvarovek, které se pohybují od 2,5 až do 5 N·mm⁻². Po výpalu již byly patrné drobné rozdíly způsobené menším množstvím korundu jako hlavní žárovzdorné složky. U některých vzorků sice opět nedošlo k porušení ve spáře, ale mírné zhoršení pevností lze pozorovat. Vzhledem k relativně nízké pevnosti lehčených tvarovek jsou dostačující i pevnosti od 2 N·mm⁻².



Graf 7.6: porovnání tmelů – pevnost spoje v ohybu po výpalu

Ze čtyř alternativ pro mleté korundové destičky se nejvíce osvědčily andaluzitový zlom a andalusit-mullitový zlom. Tyto dvě suroviny obstály jak při délkových změnách, tak v pevnostech spoje. Odpadní písek z plavení kaolinu se nedá doporučit kvůli vysokým délkovým změnám přesahující 1 %, při tak vysokém smrštění již docházelo k oddělení vrstvy tmelu od podložky. Lupek B242 BS vykazuje dostatečné hodnoty smrštění i pevnosti spoje, ovšem jeho větší zrna příliš ovlivňují celkovou zrnitost tmelu.

8 Prodloužení trvanlivosti

Nízká trvanlivost je největším problémem tmelu Regnaterm. Požadavkem je, aby ve svém obalu vydržel v použitelném stavu alespoň 6 měsíců, sérií zkoušek se toho ale nepodařilo dosáhnout. Tmel po 1 měsíci postupně ztrácel smáčivost a dále se proměnil na tuhou až tvrdou hmotu.

Každý namíchaný tmel byl uchováván zavázaný v PE pytli a uzavřený v PP vědru.



Obr. 8.1: Způsob uchování tmelů

8.1 Úprava poměru vodní sklo:voda

První varianta počítala s prodloužením zpracovatelnosti tmelu při snížení koncentrace vodního skla ředěním vodou až do poměru vodní sklo:voda 50:50. Vycházelo se z referenční receptury použité v předchozí kapitole. Na každé směsi se kontrolovala konzistence a pevnost spoje v ohybu. Konzistence byla

průběžně sledována a zaznamenávána, aby bylo možné posoudit rozdíly mezi jednotlivými tmely. Ty jsou pojmenovány podle poměru vodního skla a vody.

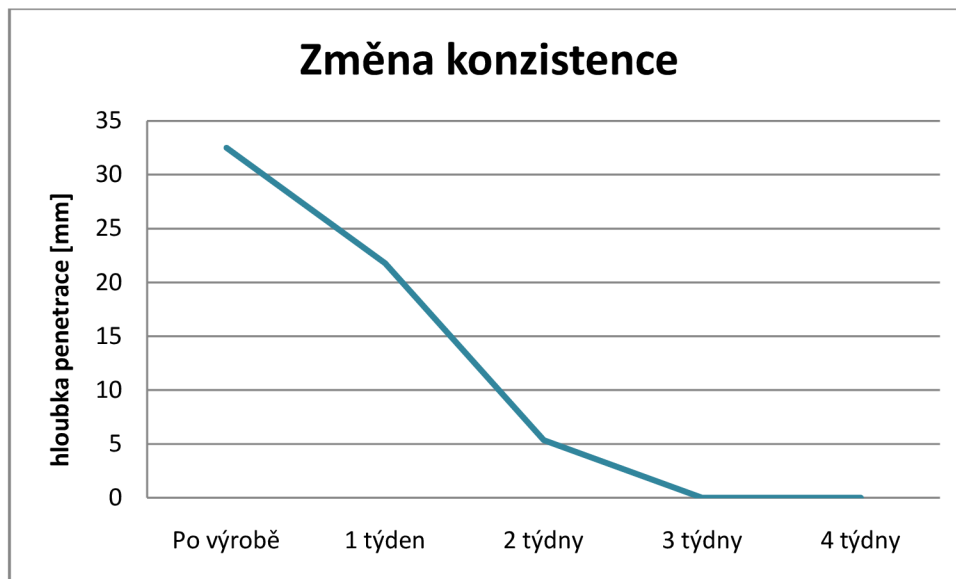
8.1.1 90:10

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	17,5	350
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Směs vodního skla	22,5	450
	Vodní sklo 36°-38° Bé	20,25	405
	Voda	2,25	45
	Dietylglykol	0,9	18

Tab. 8.1: receptura – tmel 90:10

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	32,493
1 týden	21,773
2 týdny	5,355
3 týdny	0
4 týdny	0

Tab. 8.2: změna konzistence - tmel 90:10



Graf 8.1: změna konzistence - tmel 90:10

Hloubka penetrace rapidně klesla již ve druhém týdnu od výroby. Způsobil to pravděpodobně vysoký obsah vodního skla, potvrzují to i dosažené pevnosti spoje.

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	Min. 3,9
Po výpalu 1100°C/3h	Min. 4,0

Tab. 8.3: pevnost spoje v ohybu – tmel 90:10

8.1.2 80:20

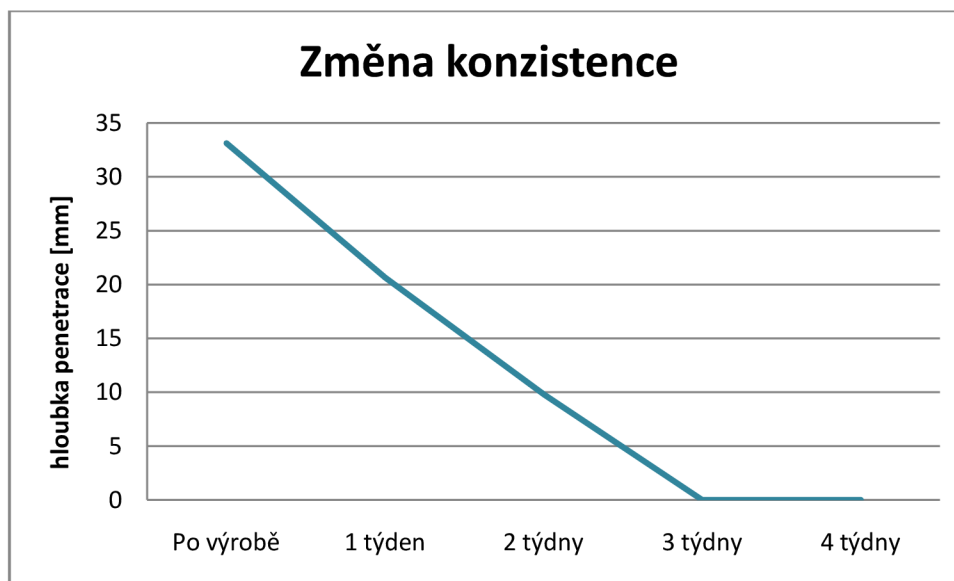
Receptura se od předchozí liší pouze v rámci pojiv. Změnil se poměr složek ve směsi vodního skla a celkové zastoupení směsi v tmelu, protože s přidavkem vody se výrazně snížila konzistence a tmel samovolně stékal.

Surovina		navážka	
		%	g
pojiva	Směs vodního skla	20,5	410
	Vodní sklo 36°-38° Bé	16,4	328
	Voda	4,1	82
	Dietylenglykol	0,9	18

Tab. 8.4: receptura – tmel 80:20

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	33,129
1 týden	20,661
2 týdny	9,798
3 týdny	0
4 týdny	0

Tab. 8.5: změna konzistence – tmel 80:20



Graf 8.2: změna konzistence – tmel 80:20

Průběh změny konzistence byl obdobný jako v předchozím případě, i tento se ukázal být nevyhovující.

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4	
[N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	Min. 5,2
Po výpalu 1100°C/3h	Min. 4,7

Tab. 8.6: pevnost spoje v ohybu – tmel 80:20

8.1.3 70:30

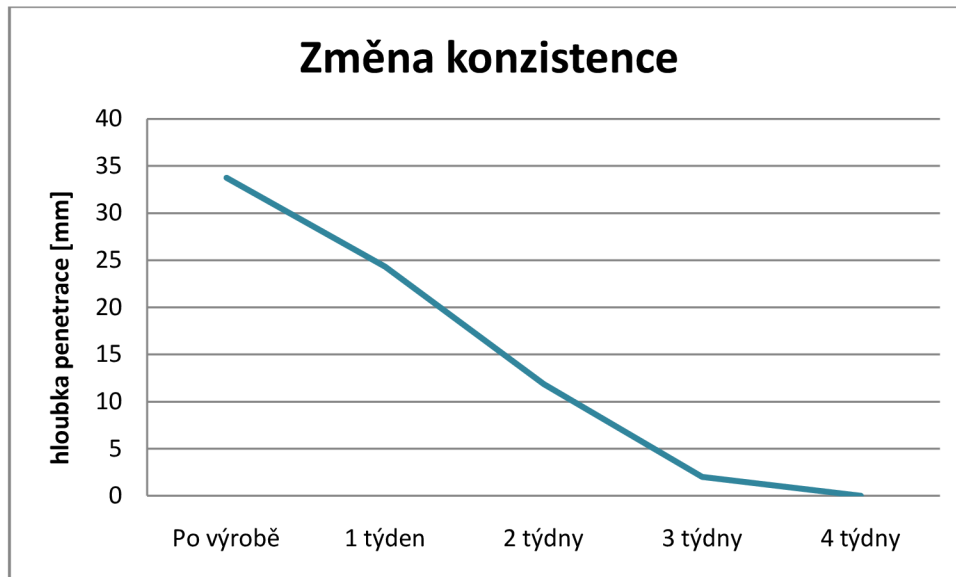
S dalším přidavkem vody bylo opět nutné snížit celkové množství směsi vodního skla, aby byla zachována potřebná konzistence.

Surovina		navážka	
		%	g
pojiva	Směs vodního skla	18	360
	Vodní sklo 36°-38° Bé	12,6	252
	Voda	5,4	108
	Dietylglykol	0,9	18

Tab. 8.7 – receptura - tmel 70:30

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	33,733
1 týden	24,304
2 týdny	11,845
3 týdny	2,018
4 týdny	0

Tab. 8.8: změna konzistence – tmel 70:30



Graf 8.3: změna konzistence – tmel 70:30

Nyní se již začíná projevovat vliv ředění vodního skla vodou. I když se trvanlivost zvýšila jen nepatrně, ukazuje se, že tato cesta by mohla vést k vyřešení problému.

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	3,1
Po výpalu 1100°C/3h	2,2

Tab. 8.9: pevnost spoje v ohybu – tmel 70:30

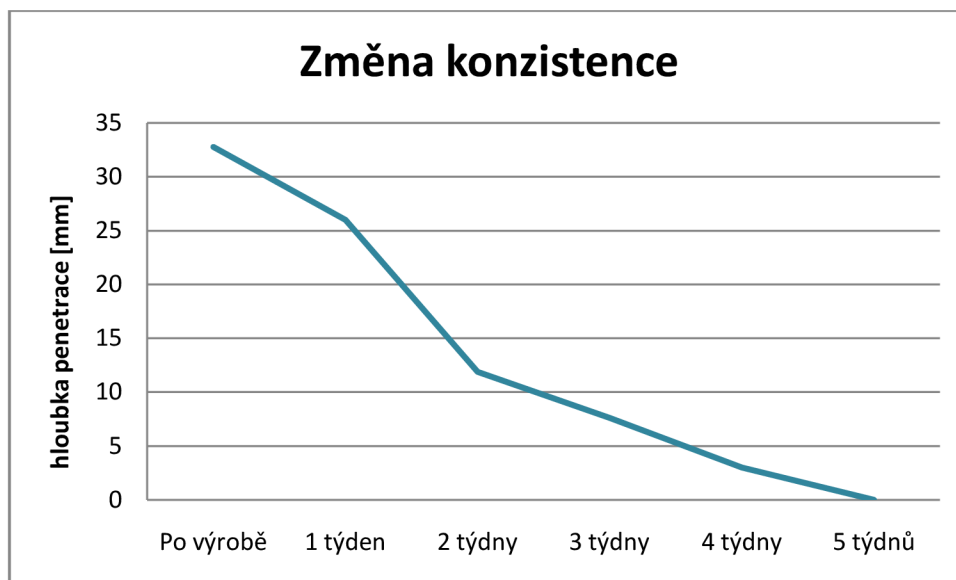
8.1.4 60:40

Surovina		navážka	
		%	g
pojiva	Směs vodního skla	17,0	340
	Vodní sklo 36°-38° Bé	10,2	204
	Voda	6,8	136
	Dietylenglykol	0,9	18

Tab. 8.10: receptura – tmel 60:40

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	32,752
1 týden	25,989
2 týdny	11,875
3 týdny	7,612
4 týdny	3,008
5 týdnů	0

Tab. 8.11: změna konzistence – tmel 60:40



Graf 8.4: změna konzistence – tmel 60:40

Zpracovatelnost se dále prodlužuje, začíná se ale projevovat nedostatek zkušební metody měření konzistence. I když po 5 týdnech již nenastala žádná penetrace, po opětovném rozmíchání a přidavku malého množství vody, se s tmelem dalo opět bez problému pracovat. Menší množství vodního skla se začalo projevovat v pevnostech spoje. Po vysušení, kdy je vazba jen chemická, je pevnost výrazně nižší než po výpalu, kdy se vytvořila keramická vazba.

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	2,4
Po výpalu 1100°C/3h	3,8

Tab. 8.12: pevnost spoje v ohybu – tmel 60:40

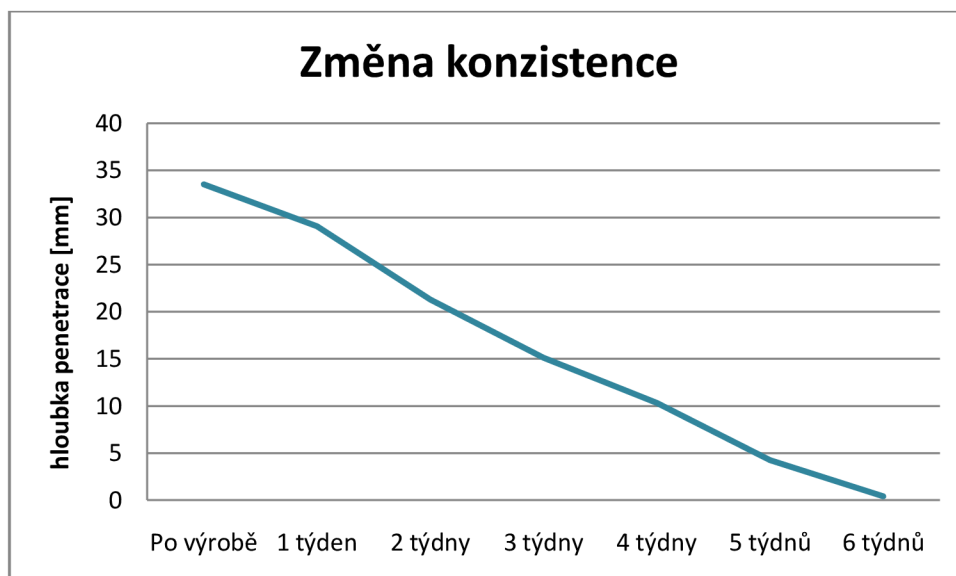
8.1.5 50:50

Surovina		navážka	
		%	g
pojiva	Směs vodního skla	16,5	330
	Vodní sklo 36°-38° Bé	8,25	165
	Voda	8,25	165
	Dietylenglykol	0,9	18

Tab. 8.13: receptura – tmel 50:50

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	33,510
1 týden	29,057
2 týdny	21,298
3 týdny	15,116
4 týdny	10,332
5 týdnů	4,250
6 týdnů	0,409

Tab. 8.14: změna konzistence – tmel 50:50



Graf 8.5: změna konzistence – tmel 50:50

Tmel byl zpracovatelný zhruba 8 týdnů od výroby, poté již, jako všechny předchozí, ztratil svoji plasticitu, změnil se v tuhou látku, kterou nebylo možné dále rozmíchat do použitelného stavu.

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	1,8
Po výpalu 1100°C/3h	2,1

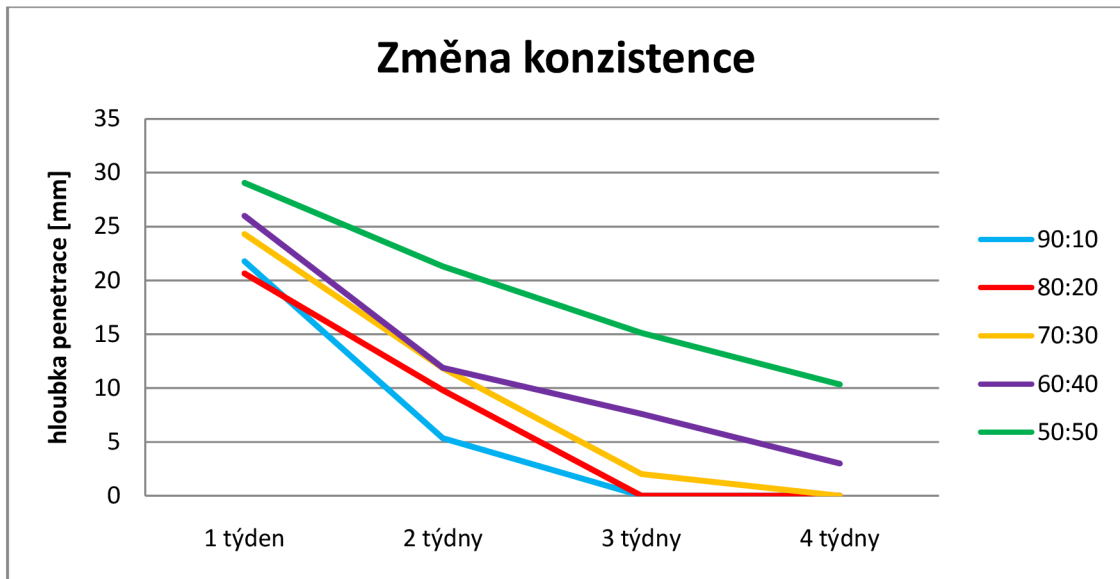
Tab. 8.15: pevnost spoje v ohybu – tmel 50:50

8.1.6 Vyhodnocení

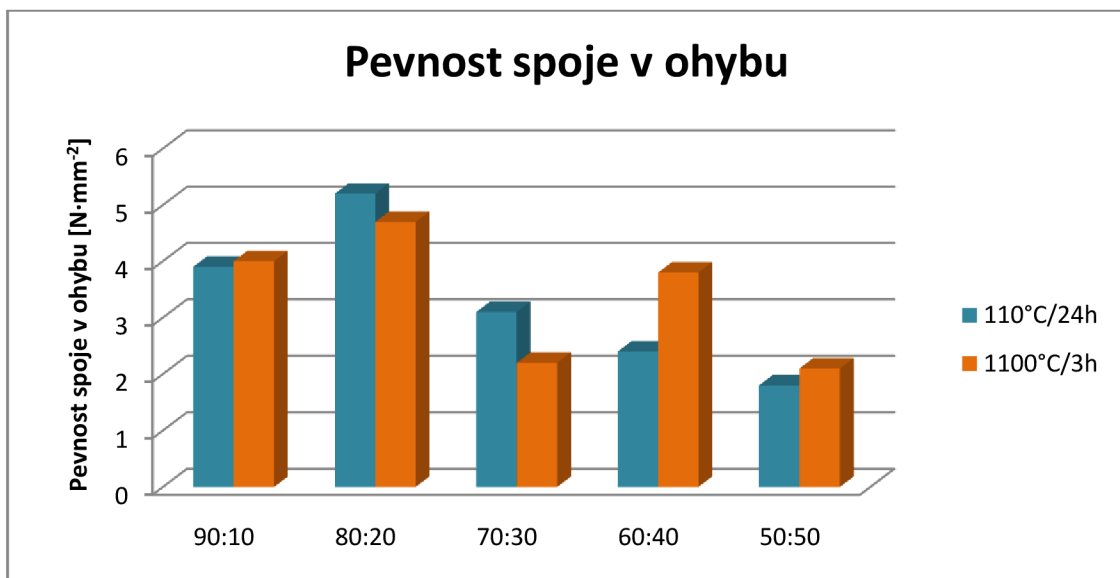
Na první pohled je jasné, že mísení vodního skla s vodou v různém poměru opravdu ovlivňuje životnost tmelu. Negativně je tím ale ovlivněna pevnost spoje, která se logicky snižuje s ubývajícím vodním sklem, coby hlavní pojivové složky. Pevnosti kolem 2 N·mm⁻² jsou ovšem, dle mého názoru, ještě plně dostačující, jelikož lehčené žárovzdorné tvarovky dosahují pevností mezi 3 a 5 N·mm⁻², a pro tyto materiály je tmel Regnaterm primárně určen. Další snižování obsahu vodního skla už, vzhledem k vývoji pevností, doporučit nelze.

Shrnutí	Konzistence				Pevnost spoje v ohybu	
	1 týden	2 týdny	3 týdny	4 týdny	110°C/24h	1100°C/3h
Vodní sklo:voda	[mm]				[N·mm ⁻²]	
90:10	21,773	5,355	0	0	3,9	4,0
80:20	20,661	9,798	0	0	5,2	4,7
70:30	24,304	11,845	2,018	0	3,1	2,2
60:40	25,989	11,875	7,612	3,008	2,4	3,8
50:50	29,057	21,298	15,116	10,332	1,8	2,1

Tab. 8.16: shrnutí vlastností



Graf 8.6: porovnání změny konzistence všech tmelů



Graf 8.7: porovnání pevností spoje v ohybu

Nicméně problém předčasného tuhnutí vyřešen nebyl, protože i poslední tmel vydržel v použitelném stavu sotva měsíc a půl. Zdroj této vady tedy není možné hledat jen v množství a koncentraci vodního skla, ale pravděpodobně v jeho chemické reakci s některou další surovinou v receptuře.

8.2 Vypuštění dietylenglykolu a penetrační přísady

Dietylenglykol se do tmelu přidával kvůli urychlení tuhnutí po aplikaci, penetrační přísada má za úkol zajistit „nevysychání“ tmelu po nanesení na porézní podklad.

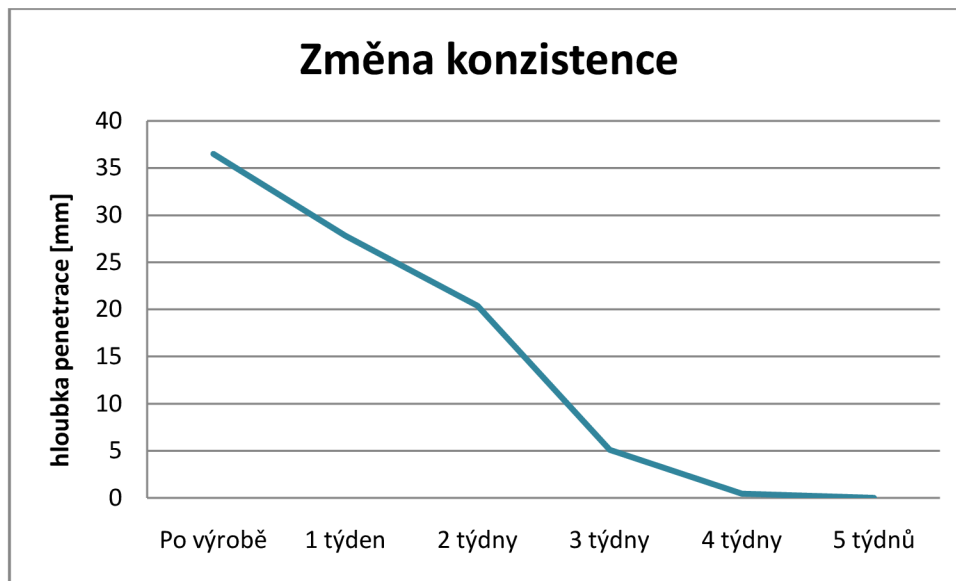
První receptura je bez dietylenglykolu a měla za úkol ověřit, do jaké míry má tato urychlovací přísada vliv na konzistenci.

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST9	10,6	212
	Korundové destičky	17,5	350
	Sioxid	2,7	54
	Plavený kaolín	4,0	80
přísady	UZIN PE 260	2,0	20
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Směs vodního skla	23,4 (17,0)	468 (340)
	Vodní sklo 36°-38° Bé	14,0 (10,2)	280 (204)
	Voda	9,4 (6,8)	188 (136)
	Dietylenglykol	-	-

Tab. 8.17: receptura – tmel bez dietylenglykolu

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	36,481
1 týden	27,803
2 týdny	20,372
3 týdny	5,079
4 týdny	0,429
5 týdnů	0

Tab. 8.18: změna konzistence – tmel bez dietylglykolu

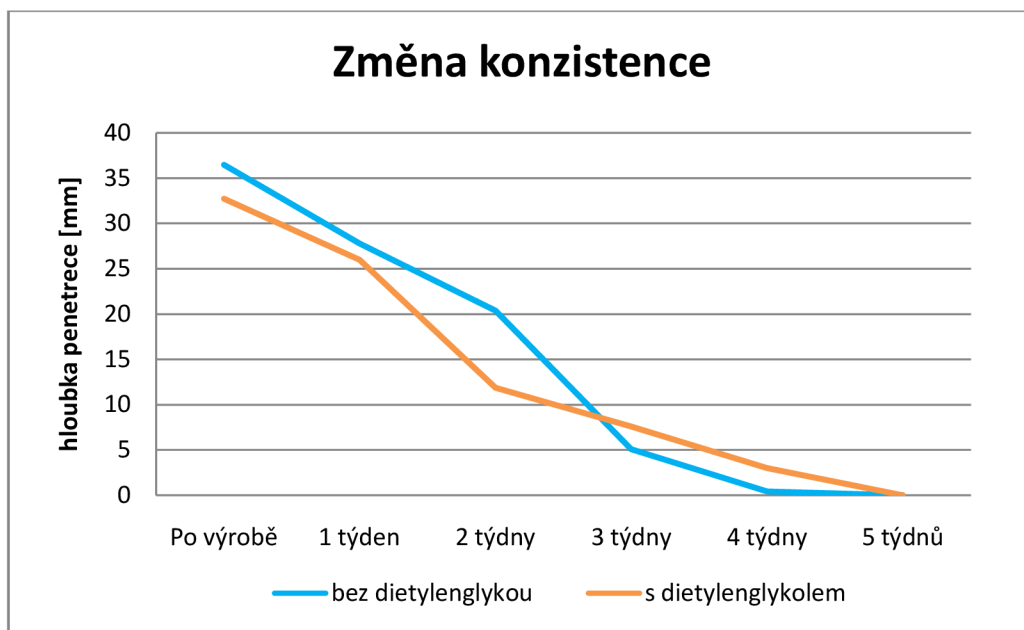


Graf 8.8: změna konzistence – tmel bez dietylglykolu

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]	
Po vysušení 110°C/24h	Min. 3,0
Po výpalu 1100°C/3h	Min. 3,4

Tab. 8.19: pevnost spoje v ohybu – tmel bez dietylglykolu

Dietylglykol podle předpokladu nemá žádný zásadní vliv na nízkou trvanlivost a slouží pouze jako urychlovač tuhnutí po aplikaci. Podobně dopadla i receptura bez penetrační přísady, jejíž absence výsledky také nijak neovlivnila.



Graf 8.9: změna konzistence – tmel bez dietylenglykolu a tmel s dietylenglykolem

8.3 Tmel NT 1350

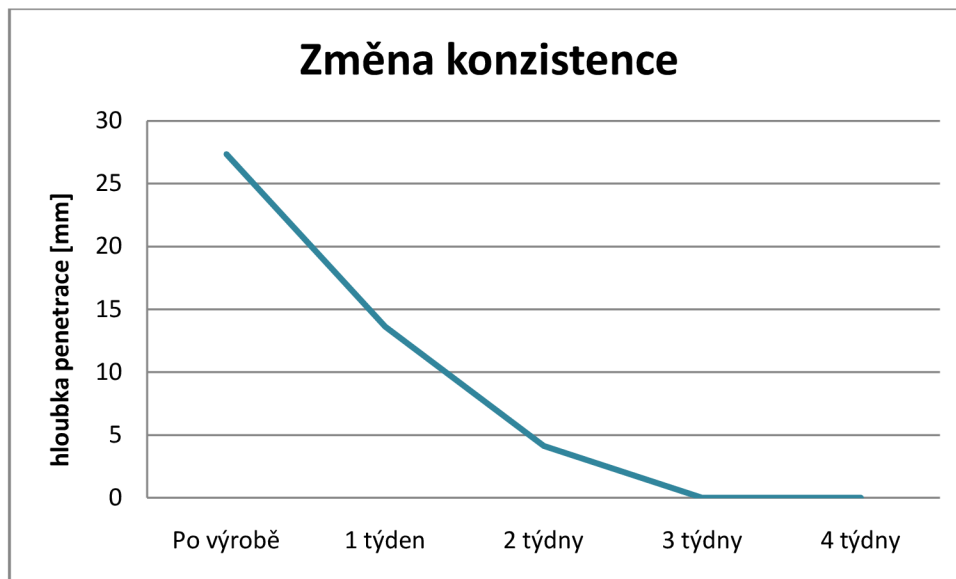
Tato receptura vychází z původní receptury tmelu, který se vyráběl v letech 1982 - 1985 v množství několika stovek tun ročně. Nebyl u něj výraznější problém s trvanlivostí, pouze se sedimentací. Modifikovaná receptura, která již nebyla pro nedostatek času firmou SEEIF Ceramic, a.s. odzkoušena, obsahuje navíc penetrační přísadu kvůli použití na porézní materiály a karboxymethylcelulózu.

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	22,0	440
	Křemen mletý ST6	12,5	250
	Lupek tříděný	24,0	480
	Sioxid	5,0	100
	Jíl B1	8,7	174
přísady	UZIN PE 260	2,5	50
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36°-38° Bé	20,0	400
	Voda	5,0	100

Tab. 8.20: receptura – tmel NT 1350

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	27,344
1 týden	13,609
2 týdny	4,116
3 týdny	0

Tab. 8.21: změna konzistence – tmel NT 1350



Graf 8.10: změna konzistence – tmel NT 1350

Díky většímu množství mikrosiliky bylo v tmelu přítomno více jemných podílů, a to přispělo k lepší roztíratelnosti. Také pevnosti jsou vynikající, což souvisí s vysokým obsahem vodního skla. Nicméně co se týká trvanlivosti, jedná se o nejhorší tmel ze všech zkušných. Do jednoho měsíce byl ve svém obale zatvrdlý bez možnosti na jakékoliv rozmíchání.



Obr. 8.2: stav tmelu NT 1350 po 4 týdnech

8.4 Reakce vodního skla s ostatními složkami

Dosavadní zkoušení nevedlo ke zdárnému konci, navíc bylo náročné jak časově, tak i na množství spotřebovaných surovin. Přistoupilo se proto k jinému způsobu testování, které se možná mělo provést hned na začátku.

Bylo odebráno malé množství z každé suroviny, smícháno s vodním sklem a uzavřeno v nádobě tak, aby byl zamezen přístup vzduchu. Takto připravené vzorky byly v pravidelných intervalech kontrolovány. Po jednom měsíci se celý pokus vyhodnotil a výsledky byly vzaty v úvahu pro další zkoušky.



Obr. 8.3: Reakce vodního skla se surovinami - odebrané vzorky

8.4.1 Vyhodnocení

Písek tříděný 0 – 17

- písek sedimentuje, zřetelné vrstvy vodního skla a písku, lze znovu rozmíchat
- vodní sklo je v původním stavu

Mleté korundové destičky

- korund sedimentovaný, lze jej opět snadno rozmíchat
- vodní sklo v tekutém stavu

Křemen mletý ST6

- vytvořila se lepivá, pastovitá a vysoce plastická hmota
- žádná reakce vodního skla

Plavený kaolín

- plastické těsto
- žádná změna od smíchání

Jíl B1

- plastické těsto
- žádný náznak tuhnutí

Lupek B242 BS

- lupek sedimentovaný na dně nádoby, nad ním vrstva vodního skla, lze opět rozmíchat
- vodní sklo zůstalo tekuté

Lovosa TS20

- vytvoření tuhého gelu

UZIN PE 260

- bílá gelová vrstva nad vodním sklem
- vodní sklo v tekutém stavu



Obr. 8.4: Reakce vodního skla a penetrační přísady

Mikrosilika

- vznik celistvé hmoty
- žádný zbytek tekutého vodního skla
- vytvořená hmota lze snadno rozemlít na prášek



Obr. 8.5: Reakce vodního skla a mikrosiliky



Obr. 8.6: Reakce vodního skla a mikrosiliky - detail

Ze všech surovin jen mikrosilika reagovala s vodním sklem a vytvořila tuhý celek. Ostatní plniva se při styku s vodním sklem chovala neutrálně. Reakce penetrační přísady by mohla vysvětlit horší smáčivost tmelu po delším odležení.

Na základě tohoto zjištění byla vytvořena receptura bez mikrosiliky.

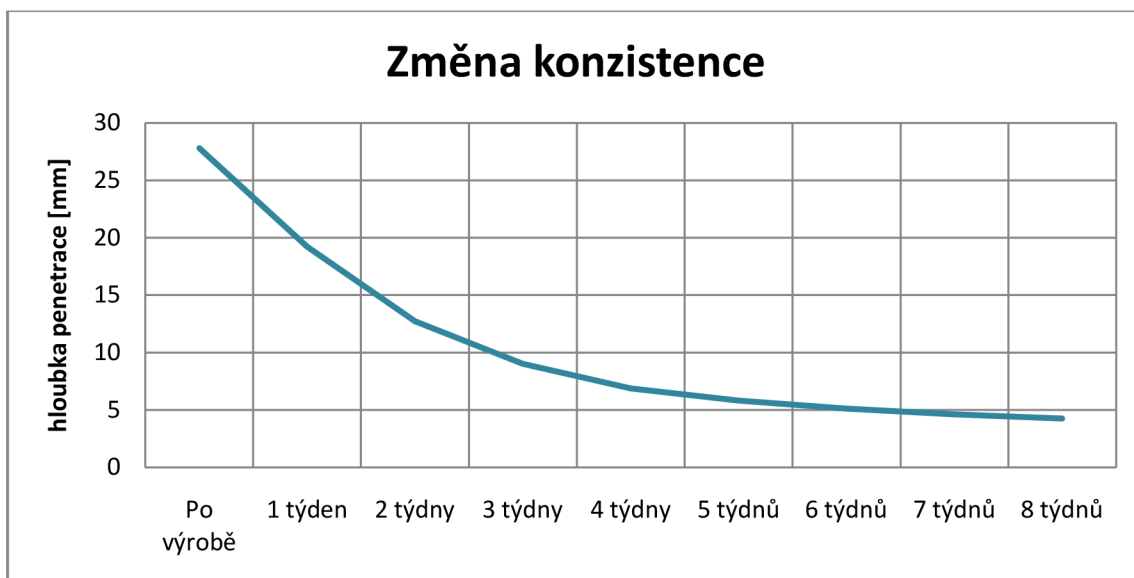
8.5 Tmel bez mikrosiliky

Surovina		navážka	
		%	g
plniva	Písek tříděný 0 - 17	39,5	790
	Křemen mletý ST6	13,3	266
	Korundové destičky	17,5	350
	Jíl B1	7,4	148
přísady	UZIN PE 260	2,0	40
	Lovosa TS20	0,3	6
pojiva	Vodní sklo 36°-38° Bé	14,0	280
	Voda	6,0	120

Tab. 8.22: receptura – tmel bez mikrosiliky

Změna konzistence	
Stáří	Hloubka penetrace [mm]
Po výrobě	27,776
1 týden	20,194
2 týdny	14,721
3 týdny	10,004
4 týdny	6,860
8 týdnů	4,249

Tab. 8.23: změna konzistence – tmel bez mikrosiliky



Graf 8.11: změna konzistence – tmel bez mikrosiliky

Po čtyřech týdnech byl tmel s malým přídavkem vody rozmíchán a vytvořila se sada zkušebních vzorků pro pevnost spoje v ohybu.

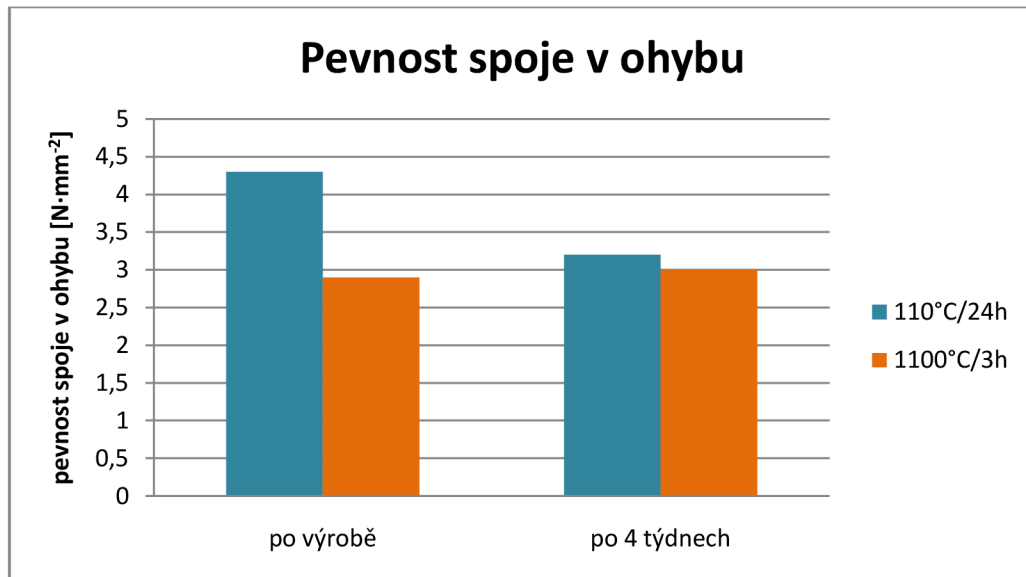
Vlastnosti		
Zrnitost	-	0 – 0,3 mm
Nadsítné	-	Max. 3 %
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	0,18 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	0,34 %
Pevnost spoje v ohybu po vysušení 110°C/24h	ISO 13765-4	Min. 4,3 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu po výpalu 1100°C/3h	ISO 13765-4	2,9 N·mm ⁻²
Klasifikační teplota	ČSN 72 6100	1100 °C

Tab. 8.24: vlastnosti – tmel bez mikrosiliky

Pevnost spoje v ohybu ISO 13765-4 [N·mm ⁻²]		
Stáří	Po výrobě	4 týdny
Po vysušení 110°C/24h	Min. 4,3	3,2
Po výpalu 1100°C/3h	2,9	3,0

Tab. 8.25: pevnost spoje v ohybu – tmel bez mikrosiliky

Oproti všem ostatním tmelům je tento bez mikrosiliky použitelný i dva měsíce od vyrobení a nic nenasvědčuje tomu, že by v tomto stavu nemohl vydržet ještě déle. Menším problémem může být rychlejší vysychání tmelu, protože po nějaké době přestává působit penetrační přísada. Toto se ale na pevnostech po jednom měsíci nijak neprojeví, ty se prakticky rovnají pevnostem zjištěným ihned po výrobě.



Graf 8.12: pevnost spoje v ohybu – tmel bez mikrosiliky

8.6 Vyhodnocení

Bylo prokázáno, že změnou poměru vodní sklo:voda sice dojde k prodloužení trvanlivosti, ale není to hlavní příčina předčasného tuhnutí tmelu. Bylo evidentní, že takto rychlou ztrátu zpracovatelnosti musí způsobovat chemická reakce vodního skla s některou další surovinou.

Následným zkoušením bylo zjištěno, že jediná mikrosilika vyvolala s vodním sklem reakci, která způsobila vznik tuhého celku. Ostatní suroviny buď ve vodním skle sedimentovaly, nebo tvořily plastickou až tekutou hmotu. Na základě tohoto zjištění byla vytvořena receptura, která mikrosiliku neobsahovala.

Bez mikrosiliky se mírně zhoršila roztíratelnost tmelu po podložce, ale nedošlo k zásadním změnám v pevnostech spoje. Rozhodujícím způsobem se ale prodloužila zpracovatelnost, hlavní sledovaná vlastnost. Na ostatních tmelech bylo už po měsíci znát, že použitelné dlouho nevydrží. Naopak tmel bez mikrosiliky šel snadno rozmíchat, ačkoliv už neměl původní konzistenci a pracovalo se s ním téměř tak dobře jako s čerstvým.

Kombinací odstranění mikrosiliky, vhodného poměru vodního skla a vody a další úpravou receptury by snad bylo možné dosáhnout ideálních vlastností, co se týká pevnosti a trvanlivosti. Do budoucna by se mohlo uvažovat o odstranění penetrační přísady z receptury, protože po nějaké době již neplní svou funkci, tedy nezabraňuje odsátí vody porézním materiálem, zkracuje se tak doba stability spoje. Místo ní by bylo vhodnější vytvářet na spojovaných tvarovkách adhezní můstek, například směs tmelu a vody v poměru 1:1.

9 Suchá směs

Suchá směs bude mít bezpochyby mnohem menší problémy s trvanlivostí, přináší s sebou ovšem další náklady spojené s výrobou, pokud není podnik vybaven potřebným zařízením na výrobu suchých směsí. Další nevýhodou suché směsi může být nechut' nebo jistá pohodlnost konečného zákazníka si tento tmel míchat doma, když je na trhu spousta jiných, již připravených k použití.

Nápad vymyslet také suchou směs pramenil hlavně ze zájmu o porovnání vlastností, výhod a nevýhod tmelů s tekutým a suchým vodním sklem.

9.1 Susil 3,3

Susil 3,3 je sušené vodní sklo vyráběné firmou Vodní sklo a.s.

SiO ₂ [% hm.]	58,0 – 68,0
Na ₂ O [% hm.]	16,0 – 22,0
Molární modul	3,2 – 3,5
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³]	450 – 750
Ztráta žíháním (800°C) [%]	16 – 20 (23)

Tab. 9.1: vlastnosti – Susil 3,3

[14]

Výchozí hodnota pro přepočet byla 18 % tekutého vodního skla, ekvivalentní množství sušeného vodního skla se přepočítal podle obsahu SiO₂. Celkem byly namíchány tři směsi s mírně se lišícím složením.

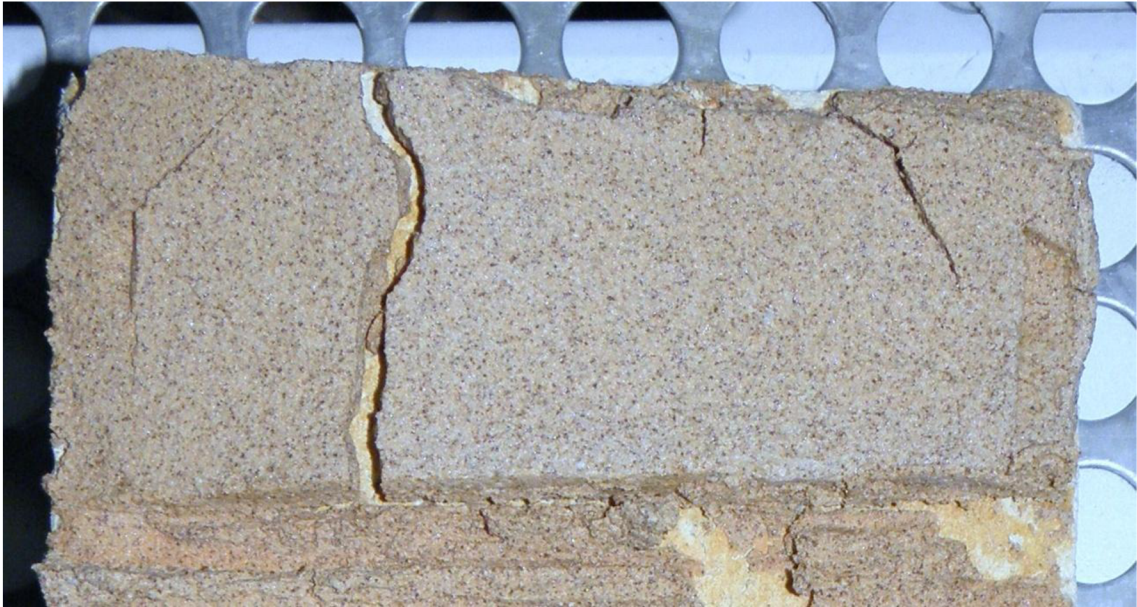
Surovina	Receptura		
	I.	II.	III.
Písek tříděný 0 - 17	45,0 %	45,0 %	45,0 %
Křemen mletý ST6	11,5 %	-	-
Andaluzit-mullitový zlom	-	11,5 %	11,5 %
Mikrosilika	3,5 %	3,5 %	3,5 %
Korundové destičky	19,5 %	19,5 %	-
Lupek B242 BS	-	-	19,5 %
Jíl B1	10,5 %	10,5 %	10,5 %
Susil 3,3	7,7 %	7,7 %	7,7 %
Lovosa TS20	0,3 %	0,3 %	0,3 %
UZIN PE 260	2,0 %	2,0 %	2,0 %
Voda	15 – 20 %		

Tab. 9.2: receptura – suché směsi

Vlastnosti		I.	II.	III.
Zrnitost	-	0 – 0,3 mm	0 – 0,3 mm	0 – 0,5 mm
Nadsítne	-	Max. 3 %	Max. 3 %	Max. 2 %
Délkové změny sušením 110°C/24h	ČSN 72 6100	-*	0,20 %	0,29 %
Celkové délkové změny 1100°C/4h	ČSN 72 6100	-	0,75 %	0,56 %
Pevnost spoje v ohybu 110°C/24h	ISO 13765-4	2,1 N·mm ⁻²	1,9 N·mm ⁻²	2,1 N·mm ⁻²
Pevnost spoje v ohybu 1100°C/3h	ISO 13765-4	3,0 N·mm ⁻²	2,4 N·mm ⁻²	1,1 N·mm ⁻²
Klasifikační teplota	ČSN 72 6100	-	1200 °C	1200 °C

Tab. 9.3: vlastnosti – suché směsi

* na zkušebních tělesech vznikly vlivem sušení rozsáhlé trhliny znemožňující posouzení smrštění

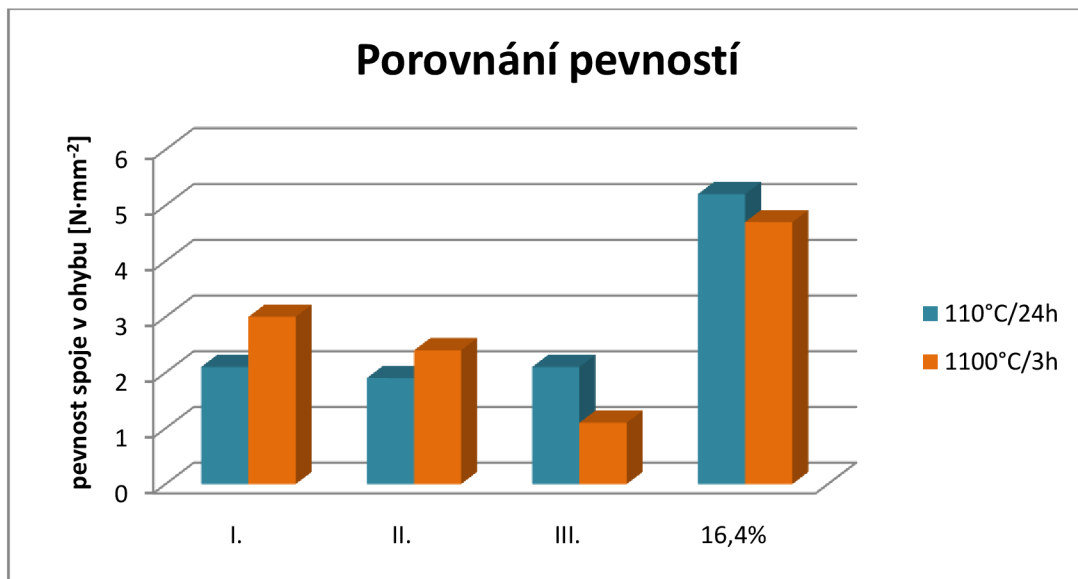


Obr. 9.1: Trhliny vzniklé vlivem smrštění při sušení

9.2 Vyhodnocení

První tmel se sušeným vodním sklem namíchaný na obvyklou konzistenci (Vicat cca 30 mm) dosáhl velkých délkových změn. Ihned po vysušení se na zkušebních vzorcích objevily výrazné trhliny široké i několik mm. Velké smrštění pravděpodobně způsobilo větší množství vody použité při výrobě. U zbylých dvou receptur se proto přistoupilo ke snížení objemu vody z původního poměru 1:4 na 1:5, tmel neztratil příliš ze své zpracovatelnosti a smrštění se podařilo snížit na minimum.

Jednotlivé směsi se od sebe výrazněji liší jen v pevnostech spoje po výpalu, pokud nepočítáme popraskanou první směs, na které nebylo možné určit délkové změny. Nízká pevnost třetí směsi po výpalu je zaviněna nahrazením korundu lupkem, který má nižší žárovzdornost. Ukázalo se také, že přepočítání podle obsahu SiO_2 nemusí být úplně přesné, neboť pevnosti předchozích tmelů s obsahem kolem 18 % vodního skla byly vyšší až o $2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. V následujícím grafu jsou srovnány pevnosti suchých směsí a tmelu s tekutým vodním sklem zastoupeným v receptuře 16,4 %.



Graf 9.1: pevnosti spoje v ohybu – suché směsi

Největší výhodou suché směsi je samozřejmě téměř neomezená trvanlivost při dodržení pokynů pro skladování. Další výhodou je možnost výroby tmelu libovolné konzistence, je ovšem nutné brát v úvahu možné větší délkové změny a vznik trhlin. Jak se ukázalo při zkoušení trvanlivosti, penetrační přísada v tmelu po nějaké době již neplní svou funkci. Díky tomu, že se do suché směsi penetrační přísada přidává s vodou, tento problém nikdy nenastane, při použití na porézní materiály je tedy vhodnější.

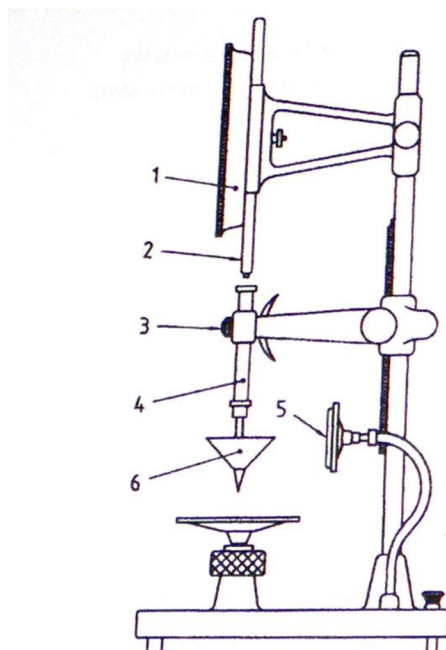
10 Inovace metodiky měření reologických vlastností

Reologie je vědní obor, který se zabývá deformačními vlastnostmi látek, zejména závislosti deformace a napětí. Konzistence tmelu je důležitá pro jeho správnou funkci a dobrou práci s ním. Dosavadní praxe spočívá v nanesení tmelu na porézní tvarovku, její naklonění a sledování, zda tmel nestéká. Tato metoda je sice rychlá a jednoduchá, ale nijak reprodukovatelná. Velkou váhu má v tomto případě lidský faktor, kdy konzistence uznaná jako přijatelná jedním člověkem, nemusí vyhovovat člověku druhému.

10.1 ISO 13765

V normě ISO 13765 jsou popsány dvě metody měření konzistence. Měření na střešacím stole se neukázalo být vhodné, protože vzhledem k vysoké soudržnosti a lepivosti tmelu nedocházelo k dostatečně výrazným rozdílům před a po zkoušce.

Druhá metoda je založena na hloubce průniku kužele do zkušebního tělesa. Vzhledem ke speciálnímu tvaru kužele může být tento způsob pro tmely výhodný. Bohužel tento, nebo alespoň tvarově podobný kužel, žádný jiný dostupný zkušební přístroj nemá.

**Legenda:**

- | | |
|---|-----------------------|
| 1 | úchylkoměr |
| 2 | ozubená tyč |
| 3 | tlačítko |
| 4 | vodící tyč |
| 5 | zrcadlo |
| 6 | standardizovaný kužel |

Obr. 10.1: Penetrometr

10.2 Nenormované metody

Vicatův přístroj je primárně určen na zkoušení cementů – normální konzistence, počátek a konec tuhnutí. Jelikož se normované metody buď neosvědčily, nebo nebyly dostupné, použil se pro stanovení konzistence Vicatův přístroj s penetračním válečkem. Aby byly výsledky co nejpřesnější, připojil se digitální úchylkoměr s přesností 0,001 mm, nahradila se tak obvyklá stupnice Vicatova přístroje po 1 mm. V počátku se objevily problémy s penetrací válečku do tmelu. Vzhledem k vysoké plasticitě se pokles nikdy zcela nezastavil, tato mírná vada byla vyřešena určením hloubky penetrace po 5 sekundách. Tato metoda je zcela dostačující pro určení konzistence ihned po namíchání, jak již ale bylo zmíněno výše, po nějaké době se hodnoty začnou blížit nule. Ale ani takový výsledek nemusí nutně znamenat nepoužitelnost tmelu. Vicatův přístroj s penetračním válečkem je totiž velmi citlivý na změny konzistence. Tam, kde podle subjektivního hodnocení je téměř nezatelný rozdíl, může být na Vicatově přístroji rozdíl i přes 10 mm.

Zajímavá se zdá být možnost využít zařízení pro stanovení plasticity zemin. Konkrétně jedna v zahraničí používaná metoda by mohla být pro žárovzdorné

tmely ideální. Jedná se o penetrometr, který je vedle číselné stupnice vybaven také digitálním siloměrem. Důležitá pak je velikost síly potřebná k zatlačení zkušebního kužele/válečku do materiálu. Tímto způsobem by bylo možné zkoušet tmely jak po výrobě, tak i po delším odležení a výsledek by byl vždy jednoznačný.

Existuje celá řada možností, jak zlepšit ověřování reologických vlastností tmelu. Vedle těch jmenovaných je možné využít i různé reometry, zde se ovšem musí počítat s vyššími pořizovacími náklady. Je pouze na výrobcích, jestli se mu vyplatí investovat do vybavení, které pro výrobu není nezbytně nutné. Subjektivní hodnocení sice není ideální, ale je také pravda, že optimální konzistence těchto materiálů se neuvádí v materiálových listech ani nikde jinde.

11 Závěr

Hlavním cílem práce bylo vyřešit problém s nízkou trvanlivostí tmelu Reganterm společnosti SEEIF Ceramic, a.s. Po sérii neúspěšných zkoušek se nakonec podařilo tuto vadu odstranit. Způsobena byla pravděpodobně reakcí vodního skla s mikrosilikou, která se přidávala kvůli lepší roztíratelnosti tmelu. Mikrosilika spolu s vodním sklem reagovala za vzniku tuhého kompaktního celku. Vzhledem k tomu, že se mikrosilika přidávala do obdobných tmelů již dříve a podobné problémy nenastaly, zůstává záhadou, proč se tak děje nyní. Nejpravděpodobnějším vysvětlením je, že se změnili dodavatelé surovin a ty spolu nyní reagují jinak, než tomu bylo předtím.

Dalším cílem bylo nahrazení mletých korundových destiček, coby hlavního nositele žárovzdornosti, jinou, levnější variantou při zachování původních vlastností tmelu. Byla zkoušena čtyři různá plniva, z nichž dvě se osvědčila a mohou být použita jako náhrada korundu v tmelu.

Posledním úkolem bylo navrhnout vhodnou metodu zkoušení reologických vlastností tmelu a nahradit tak dosavadní subjektivní hodnocení konzistence. Rozebráno bylo několik možností, jak tyto vlastnosti tmelu posuzovat.

Nakonec byla ještě jako alternativa navržena směs se sušeným vodním sklem.

12 Seznam použité literatury

- [1] TOMŠŮ, František a Štefan PALČO. *Žárovzdorné materiály IV.: Netvarové žárovzdorné materiály*. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2009. ISBN 978-80-02-02170-4.
- [2] KUTZENDORFER, Jaroslav a František TOMŠŮ. *Žárovzdorné materiály I.: Základní pojmy, rozdělení, vlastnosti*. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2008. ISBN 978-80-02-02076-9.
- [3] HERAINOVÁ, Marcela. *Žárovzdorné materiály*. Praha: Silikátový svaz, 2003, 46 s., [12] s. obr. příl. Učebnice pro střední odborné školy. ISBN 80-903-1134-2.
- [4] LUŽNÝ, Petr. PRŮMYSLOVÁ KERAMIKA, spol. s r.o. *Netvarové žárovzdorné hmoty: Žárovzdorné tmely, pestrost v kvalitě a aplikacích*. 2007.
- [5] ŽÁROHMOTY, spol. s r.o. *Žárovzdorné tmely a malty*. Dostupné z: <http://www.zarohmoty.cz/Clanky.html>
- [6] ČSN 72 6100. *Žárovzdorné malty, tmely a nátěry: Společná ustanovení*. Praha: Vydavatelství norem, 1991.
- [7] STN ISO 13765-1. *Žiaruvzdorné malty: Časť 1: Stanovenie konzistencie metódou vtlačania kužela*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005.
- [8] STN ISO 13765-2. *Žiaruvzdorné malty: Časť 2: Stanovenie konzistencie na striasacom stole*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005.
- [9] STN ISO 13765-3. *Žiaruvzdorné malty: Časť 3: Stanovenie stability spoja*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005.
- [10] STN ISO 13765-4. *Žiaruvzdorné malty: Časť 4: Stanovenie pevnosti spoja v ohybe*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005.
- [11] STN ISO 13765-5. *Žiaruvzdorné malty: Časť 5: Stanovenie zrnitosti (sitová analýza)*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2005.

- [12] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2002. ISBN 80-7204-234-3.
- [13] VODNÍ SKLO, a.s. *Vodní sklo sodné: specifikace*. Brno, 2010.
- [14] VODNÍ SKLO, a.s. *Sušené silikáty - Susil: specifikace*. Brno, 2009.
- [15] SKLOPÍSEK STŘELEČ, a.s. *Katalog produktů 2012*. Hrdoňovice, 2012.
Dostupné z: <http://www.glassand.eu/files/Katalog.pdf>

13 Seznam tabulek

- Tab. 7.1: receptura – referenční tmel
- Tab. 7.2: vlastnosti – referenční tmel
- Tab. 7.3: receptura – tmel s odpadním pískem
- Tab. 7.4: vlastnosti – tmel s odpadním pískem
- Tab. 7.5: receptura – tmel s andalusit – mullitovým zlomem
- Tab. 7.6: vlastnosti – tmel s andalusit – mullitovým zlomem
- Tab. 7.7: receptura – tmel s andalusitovým zlomem
- Tab. 7.8: vlastnosti – tmel s andalusitovým zlomem
- Tab. 7.8: receptura – tmel s lupkem B242 BS
- Tab. 7.9: vlastnosti – tmel s lupkem B242 BS
- Tab. 7.10: shrnutí vlastností tmelů
- Tab. 8.1: receptura – tmel 90:10
- Tab. 8.2: změna konzistence - tmel 90:10
- Tab. 8.3: pevnost spoje v ohybu – tmel 90:10
- Tab. 8.4: receptura – tmel 80:20
- Tab. 8.5: změna konzistence – tmel 80:20
- Tab. 8.6: pevnost spoje v ohybu – tmel 80:20
- Tab. 8.7: receptura - tmel 70:30
- Tab. 8.8: změna konzistence – tmel 70:30
- Tab. 8.9: pevnost spoje v ohybu – tmel 70:30
- Tab. 8.10: receptura – tmel 60:40
- Tab. 8.11: změna konzistence – tmel 60:40
- Tab. 8.12: pevnost spoje v ohybu – tmel 60:40
- Tab. 8.13: receptura – tmel 50:50
- Tab. 8.14: změna konzistence – tmel 50:50
- Tab. 8.15: pevnost spoje v ohybu – tmel 50:50
- Tab. 8.16: shrnutí vlastností
- Tab. 8.17: receptura – tmel bez dietylenglykolu
- Tab. 8.18: změna konzistence – tmel bez dietylenglykolu
- Tab. 8.19: pevnost spoje v ohyb – tmel bez dietylenglykolu
- Tab. 8.20: receptura – tmel NT 1350

Tab. 8.21: změna konzistence – tmel NT 1350

Tab. 8.22: receptura – tmel bez mikrosiliky

Tab. 8.23: změna konzistence – tmel bez mikrosiliky

Tab. 8.24: vlastnosti – tmel bez mikrosiliky

Tab. 8.25: pevnost spoje v ohybu – tmel bez mikrosiliky

Tab. 9.1: vlastnosti – Susil 3,3

Tab. 9.2: receptura – suché směsi

Tab. 9.3: vlastnosti – suché směsi

14 Seznam grafů

- Graf 5.1: křivka zrnitosti – písek tříděný 0 – 17
- Graf 5.2: křivka zrnitosti – Křemen mletý ST9
- Graf 5.3: křivka zrnitosti – mikrosilika
- Graf 5.4: křivka zrnitosti – mleté korundové destičky
- Graf 7.1: křivka zrnitosti – odpadní písek z plavení kaolinu
- Graf 7.2: křivka zrnitosti – andalusit – mullitový zlom
- Graf 7.3: křivka zrnitosti – andalusitový zlom
- Graf 7.4: křivka zrnitosti – lupek B242 BS
- Graf 7.5: porovnání tmelů – celkové délkové změny
- Graf 7.6: porovnání tmelů – pevnost spoje v ohybu po výpalu
- Graf 8.1: změna konzistence - tmel 90:10
- Graf 8.2: změna konzistence – tmel 80:20
- Graf 8.3: změna konzistence – tmel 70:30
- Graf 8.4: změna konzistence – tmel 60:40
- Graf 8.5: změna konzistence – tmel 50:50
- Graf 8.6: porovnání změny konzistence všech tmelů
- Graf 8.7: porovnání pevností spoje v ohybu
- Graf 8.8: změna konzistence – tmel bez dietylglykolu
- Graf 8.9: změna konzistence – tmel bez dietylglykolu a tmel s
dietylglykolem
- Graf 8.10: změna konzistence – tmel NT 1350
- Graf 8.11: změna konzistence – tmel bez mikrosiliky
- Graf 8.12: pevnost spoje v ohybu – tmel bez mikrosiliky
- Graf 9.1: pevnosti spoje v ohybu – suché směsi

15 Seznam obrázků

Obr. 6.1: Vicatův přístroj s digitálním úchylkoměrem

Obr. 6.2: Pevnost spoje v ohybu – zkušební těleso

Obr. 6.3: Pevnost spoje v ohybu – tříbodový ohyb

Obr. 7.1: Porušení zkušebního tělesa mimo tmel

Obr. 8.1: Způsob uchovávání tmelů

Obr. 8.2: Stav tmelu NT 1350 po 4 týdnech

Obr. 8.3: Reakce vodního skla se surovinami - odebrané vzorky

Obr. 8.4: Reakce vodního skla a penetrační přísady

Obr. 8.5: Reakce vodního skla a mikrosiliky

Obr. 8.6: Reakce vodního skla a mikrosiliky - detail

Obr. 9.1: Trhliny vzniklé vlivem smrštění při sušení

Obr. 10.1: Penetrometr