

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**ALEŠ
HOCH**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Sledování vlivu podílu regenerátu
ve formovací směsi na její kvalitu**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Hoch Aleš

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Irena Kubelková, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN Bez specializace

Praha 2023

(sken oficiálního zadání závěrečné práce bez podpisů – do vytištěné práce se na toto místo vloží zadání podepsané)

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ireny Kubelkové, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce paní Ing. Ireně Kubelkové, Ph.D. a konzultantovi panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a konzultace během zpracovávání této práce.

Poděkování patří zároveň firmě ZPS – SLÉVÁRNA, a.s., především zaměstnancům pískového oddělení, za poskytnutí laboratorních prostorů a asistence při měření a provádění zkoušek souvisejících s experimentální částí bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům za morální podporu během celého bakalářského studia. Největší poděkování patří mé rodině za jejich nekonečnou a celoživotně trvající podporu jak po dobu studia, tak života.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá složením slévárenských formovacích směsí obsahujících různý poměr nového ostřiva a regenerátu. V práci jsou popsány materiály formovacích směsí využívaných ve společnosti ZPS - SLÉVÁRNA, a.s., mezi které patří např.: křemenné ostřivo, bentonit a vodní sklo. Dále jsou zmíněny vlastnosti a možnosti regenerace formovacích směsí. Experimentální část bakalářské práce se věnuje technologickým zkouškám formovacích směsí a ostřiv a jejich následnému vyhodnocení.

Název diplomové práce:	Sledování vlivu podílu regenerátu ve formovací směsi na její kvalitu
Autor práce:	Aleš Hoch
Vedoucí práce:	Ing. Irena Kubelková, Ph.D.
Konzultant:	doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Rozsah práce:	48 stránek, 8 tabulek, 19 obrázků
Klíčová slova:	formovací směs, vodní sklo, ostřivo, regenerace formovacích směsí, technologické zkoušky ostřiva, regenerátu a formovacích směsí

Annotation

The bachelor thesis deals with the composition of foundry moulding mixtures containing different proportions of new cutting agent and regenerate. The thesis describes the materials of the moulding mixtures used in ZPS - SLÉVÁRNA, a.s., which include, for example: quartz sand, bentonite and water glass. The experimental part of the bachelor thesis is devoted to the technological tests of moulding mixtures and foundry sands and their subsequent evaluation.

Title of the final thesis:	Monitoring the influence of the proportion of regenerate in the moulding mixture on its quality
Author:	Aleš Hoch
Supervisor:	Ing. Irena Kubelková, Ph.D.
Consultant:	doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	48 pages, 8 tables, 19 pictures
Keywords:	moulding mixture, water glass, foundry sand, regeneration of moulding mixtures, technological tests of foundry sand, regenerated sand and moulding mixtures

Obsah

1. Úvod a cíl práce	11
2. Slévárenské formovací směsi	12
2.1 Ostřivo.....	12
2.1.1 Křemenné písky	13
2.1.2 Bzenec.....	14
2.1.3 Šajdíkové Humence	15
2.2 Pojivo.....	15
2.2.1 Bentonit	16
2.2.2 Vodní sklo	16
2.4 Nátěry	18
2.5 Vlastnosti formovacích směsí	19
2.5.1 Fyzikální vlastnosti formovacích směsí	19
2.5.2 Chemické vlastnosti formovacích směsí	20
2.5.3 Technologické vlastnosti formovacích směsí.....	20
3. Regenerace formovacích směsí.....	22
3.1 Suchá regenerace.....	23
3.1.1 Mechanická	23
3.1.2 Pneumatická.....	24
3.2 Mokrý regenerace.....	24
4. Experimentální část.....	26
4.1 Stanovení životnosti formovací směsi	28
4.2 Zkouška pevnosti v tlaku.....	31
4.3 Granulometrický rozbor.....	35
4.4 Stanovení množství vyplavitelných látek.....	39

5. Závěr.....	42
Seznam použitých zdrojů literatury.....	44
Seznam tabulek	47
Seznam grafů	47
Seznam obrázků.....	47
Seznam příloh	48

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Vysvětlení	Jednotka
FeO	oxid železnatý	-
MnO	oxid manganatý	-
SiO ₂	oxid křemičitý	-
ρ	hustota	kg · m ⁻³
CO ₂	oxid uhličitý	-
Na ₂ O	oxid sodný	-
λ	součinitel tepelné vodivosti	W · m ⁻¹ · K ⁻¹
a	součinitel teplotní roztažnosti	m ² · s ⁻¹
b _f	součinitel tepelné akumulace	J · m ⁻² · K ⁻¹ · s ^{-1/2}
α	teplotní délková roztažnost	K ⁻¹
NaOH	hydroxid sodný	-
R _t	pevnost ve střihu	KPa
R _c	pevnost v tlaku	KPa
ŠH	Šajdíkovce Humence	-
REG	regenerát	-
Fe	železo	-
Cr	chrom	-
Mn	mangan	-
Na	sodík	-

1. Úvod a cíl práce

Formovací směsi zná, aniž by to možná tušil, každý člověk. V raném dětství sloužil např. písek k vytváření báboviček, nebo ke stavění hradů a zámků. V dospělosti je pak využíván ve stavebnictví, anebo právě strojírenství, kde se v hojně míře vyskytuje ve slévárenském průmyslu, ve kterém slouží k výrobě netrvalých forem a jader.

Bakalářská práce se díky spolupráci se slévárnou ZPS – SLÉVÁRNA, a.s., zabývá především formovacími směsmi, které se zde využívají při výrobě netrvalých pískových forem. Slévárna sídlí v Malenovicích u Zlína a svůj historický 1. odlitek odlila v roce 1982. Odlitky se zde vyrábí z litiny s lupínkovým grafitem a litiny s kuličkovým grafitem v hmotnostním rozmezí od 20 kg až do 12 tun. Používaná formovací směs se skládá z ostřiva, pojiva a dalších přídatných látek, které umožňují směsi dosáhnout požadovaných vlastností, jako je například vaznost či pevnost.

Ve slévárně se používají dva druhy formovací směsi, modelová a výplňová. Modelová směs se v současné době skládá ze 70 – 75 % regenerátu, nového ostřiva (Šajdíkové Humence), vodního skla a dalších přísad (esterol, voda). Výplňová směs se skládá z bentonitu, ostřiva (Bzenec a regenerát) a dalších přísad (voda).

Hlavním cílem bakalářské práce bylo zjistit, zda by se mohlo zvýšit procento využívaného regenerátu, aniž by toto navýšení mělo vliv na zmetkovitost či jakost povrchu odlitku. Dílčím cílem bylo vyhodnocení kvality formovacích směsí s různým obsahem regenerátu. Směsi s různým obsahem regenerátu byly podrobeny několika technologickým zkouškám, z jejichž výsledků byla nakonec zvolena nejvýhodnější formovací směs.

2. Slévárenské formovací směsi

Slévárenské formovací směsi jsou nástrojem pro výrobu netrvalých forem. Za netrvalou (jednorázovou) formu je považována ta, která se po odlití rozbije, aby se mohl vyjmout hotový surový odlitek. Použitá formovací směs se může recyklovat a opakovaně použít pro přípravu nové formovací směsi. [1]

Podle způsobu použití se formovací směsi dělí na:

- **Modelová:** připravována z nových surovin/regenerátu, pěstována na model, přímý styk se žhavým kovem
- **Výplňová:** vyplňuje zbytek objemu formovacího rámu, připravována z recyklované směsi
- **Jádrová:** skládá se z nových surovin, tvoří celý objem jádra
- **Jednotná:** používá se při tvorbě bentonitových směsí [5]

Celý objem formy je tvořen jednou směsí mimo jádra. Formovací směsi se skládají ze dvou hlavních surovin a přísad. Hlavními surovinami jsou ostřivo a pojivo. Ostřivem je nazýván zrnitý žáruvzdorný materiál, jenž tvoří hlavní objem směsi. Za pojivo se považuje látka dávající směsi vaznost a plastičnost za syrova. Po vytvrzení dodává pojivo celkové směsi pevnost. Přísadami může být voda, látky zlepšující rozpadavost směsi po odlití (bauxit, bukové piliny) a povrchovou jakost (kamenouhelná moučka, oleje). Je zapotřebí, aby výsledná formovací směs měla potřebné vlastnosti, a to např.: vaznost, pevnost, homogenita, životnost či tekutost. Celkové výsledné provedení formy se odráží jak v kvalitě odlitku, tak v hospodárnosti výroby. [1, 2]

2.1 Ostřivo

Jedná se o zrnitý žáruvzdorný materiál, jenž tvoří hlavní hmotnostní zastoupení forem a jader. Zrna ostřiva mají velikost nad 0,02 mm. Velikost částic ostřiva menší než 0,02 mm je považována za kritickou velikost. Takto malé částice jsou považovány za vyplavitelný podíl, jehož obsah ve formovací směsi by měl být pod 1 %. Mezi nejdůležitější vlastnosti ostřiva jsou řazeny hranatost a granulometrie. Ty totiž ovlivňují objemovou hmotnost a pórovitost, na níž je závislá prodyšnost, propustnost, tepelná vodivost a do značné míry také pevnost forem

a jader. Po vyplnění dutiny formy roztaveným kovem je díky pórovitosti směsi značně ovlivněn povrch odlitku, proto je výběr ostřiva o správné velikosti a tvaru zásadní. [1, 3, 5]

Ostřiva lze dělit více způsoby, a to dle původu vzniku na:

- **Přírozená:** křemenné písky, olivín, zirkon, dunit
- **Umělá:** šamotová drť, chrommagnesit, korund, kovové kuličky

Dle chemické povahy na:

- **Kyselá:** křemenné písky
- **Neutrální:** šamot, olivín, korund
- **Zásaditá:** magnesit

Ostřivo, z něhož se formovací směs připravuje se volí podle následujících kritérií:

- Chemická povaha odlévané slitiny – druh legovaného materiálu
- Druh odlévané slitiny (ocel, litina), lící teplota
- Tvarová složitost a tloušťka stěn odlitku
- Druh pojivové soustavy
- Ekonomická dostupnost s ohledem na získání maximální pevnosti

Výše uvedená kritéria splňují křemenné písky, které díky tomu patří k nejpoužívanějším z ostřiv, což dále podporuje i dostupnost v těžebních lokalitách v ČR, a také ekonomická výhodnost. Velkou nevýhodou křemenného ostřiva je reaktivnost s oxidy FeO a MnO, které obsahují některé roztavené slitiny oceli. Z tohoto důvodu se používají při výrobě formovacích směsí, kde dochází k těmto chemickým reakcím ostřiva s vyšším bodem tavení, kam patří např.: šamot, lupek, chrommagnesit, korund, zirkon anebo chromit. [1, 4]

2.1.1 Křemenné písky

Hlavním minerálem těchto ostřiv je křemen s chemickým označením SiO₂. Křemen je jeden z nejrozšířenějších minerálů, jehož teplota tání je nad 1 700°C. Díky této vlastnosti je hojně využíván právě při výrobě jednorázových forem. [1, 5]

Mezi nevýhody křemenných písků patří náchylnost k lasturnatému lomu a náchylnost na cristobalitickou expanzi. Cristobalitická expanze vzniká při ohřevu nad 900 – 1 000°C.

Jev je doprovázen změnou krystalické mřížky z hexagonální na krychlovou. Cristobalitická přeměna je spojena s nárůstem objemu, a tudíž je příčinou expanze jader a vzniku trhlin. [16]

V přírodě se křemen nejčastěji vyskytuje v krystalické modifikaci typu β – křemen. Tento typ modifikace je znám jako křemenné písky, křemence, křišťály, pískovce, anebo příměsi v kaolínech a jílech. [5]

Dalšími charakteristickými vlastnostmi křemenných písků jsou tvrdost, která na Mohsově stupnici tvrdosti dosahuje hodnoty 7. Hustota křemenných písků se pohybuje v mezích od 2 620 – 2 660 kg/m³, sypaná hmotnost je přibližně 1 500 – 1 600 kg/cm³, a vodíkový exponent pH 6 – 7,2. [1,4,5]

Obecné požadavky kladené na křemenné písky, z nichž se připravují formovací směsi, jsou následující:

- Vysoká mineralogická čistota – SiO₂ > 98 %
- Vysoká pravidelnost zrnění (nejlépe monofrakce¹)
- Malá hranatost – pro organická pojiva jsou vhodnější kulatá zrna písků
- Nízký obsah hrubých zrn – nemají obsahovat zrna nad 1,2 mm (neplatí pro masivní odlitky)
- S ohledem na jakost povrchu bývá zvykem pracovat s jemnozrnnými písky o středním průměru zrna $d_{50} = 0,22$ mm (pro masivní odlitky $d_{50} > 0,30$ mm)

[1, 4, 5]

Bakalářská práce se díky spolupráci se ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. dále zabývá už pouze ostřivy, jež se v této společnosti používají při výrobě forem a byly tudíž použity pro experimenty v praktické části. Jedná se o slévárenské ostřivo těžené v lokalitách Bzenec a Šajdíkově Humence.

2.1.2 Bzenec

Jedná se o křemenný písek, jehož naleziště se nachází na jižní Moravě v oblasti Bzence. Oblast Bzence je dnes na seznamu Národních památek. Svým tvarem a stářím patří toto ostřivo do skupiny vátých písků. [12]

¹ monofrakce = složeno ze dvou slov (mono + frakce) = jednosložkové

2.1.3 Šajdíkové Humence

Šajdík je slangový název pro křemenný písek těžený na Slovensku v oblasti Šajdíkové Humence. Toto ostřivo se stejně jako Bzenec řadí mezi váté písky. Díky své čistotě se využívá jak ve slévárenském, tak i ve sklářském průmyslu či stavebnictví. Šajdík se velmi dobře váže na bentonitové pojivo, ovšem kvůli svému vysokému obsahu živců (8 – 10 %) není příliš vhodný pro odlitky vyráběné z oceli. [1, 11]

2.2 Pojivo

Pojivo je hned po ostřivu druhým nejzastoupenějším materiálem formovací směsi. Pevnost formovací směsi závisí na interakci ostřiva a pojiva. Roli v soudržnosti těchto dvou prvků hrají adhezní a kohezní síly. Pojivo dodává směsi vlastnosti jako např.: plastičnost, spěchovatelnost, nebo schopnost zaujímat tvar podle modelu. [1, 5]

Dle původu vzniku rozdělujeme pojiva na:

- **Organická:** pryskyřice, oleje, sacharidy
- **Anorganická:** jílová pojiva, vodní sklo, pojiva na bázi anorganických solí, sádra

Dle generací se dělí na:

- **Pojiva I. Generace:** jílová pojiva (formovací směs získá svou pevnost upěchováním, vytvrzování probíhá samovolně)
- **Pojiva II. Generace:** vodní sklo, furanová a polyuretanová pojiva (vytvrzovací způsoby jsou chemické, tepelné, dehydratací anebo fyzikálně chemické – u vodního skla je podstatou vytvrzení jeho přeměna na dehydratovaný křemičitan dvojsodný a vodní páru dodáním tepla)
- **Pojiva III. Generace:** magnetické, zmrazené nebo vakuové formy (formy získávají svou pevnost působením fyzikálních sil, které zastávají funkce pojiva)

[4, 5, 17]

Jelikož se ve slévárně ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. používají pouze dva druhy pojiva při přípravě formovacích směsí, je v další části práce věnována pozornost pouze bentonitu a vodnímu sklu.

2.2.1 Bentonit

Bentonit patří mezi nejběžnější jílová pojiva používaná ve slévárenském průmyslu. Vznikl zvětráváním sopečného popela, čediče a diabasu. Hlavním minerálem v bentonitu je montmorillonit, který je tvořen přes sebe přeloženými zprohýbanými tenkými částicemi. Částice (krystaly) montmorillonitu jsou velmi tenké a dosahují velikosti 0,02 – 0,2 μm . Jsou seřazeny buď pravidelně, anebo jsou vzájemně posunuty a tvoří turbostratickou nepravidelnou mřížku, která napomáhá vniknutí vody do bentonitu a ovlivňuje tím jeho bobtnavost a vaznost. [5, 7]

Obecně se jílová pojiva rozdělují dle obsahu vody na:

- **Bezvodé směsi:** maximální obsah 0,2 %
- **Polosuché směsi:** 1,6 – 2,5 % (směsi vyžadující vysokou spěchovatelnost)
- **Směsi na syrovo:** maximální obsah 5 % (bentonit)
- **Směsi na přisoušení:** 6 – 7 % (pro lití po krátké době)
- **Směsi na sušení a vypalování:** nad 6 – 7 % (šamotové směsi obsahující chemicky vázanou vodu) [5, 7]

Podle bobtnavosti se bentonit rozděluje:

- **Silně bobtnavý:** sodné bentonity (vyskytují se v USA)
- **Méně bobtnavý:** draselné, vápenaté a hořečnaté bentonity [5, 7]

Bentonit se kromě slévárenského průmyslu využívá ve stavebnictví, kde slouží jako těsnění, při čištění odpadních vod, do keramických hmot, při kompostování atd. V České republice patří mezi nejvýznamnější naleziště bentonitu především západ Čech. [8]

2.2.2 Vodní sklo

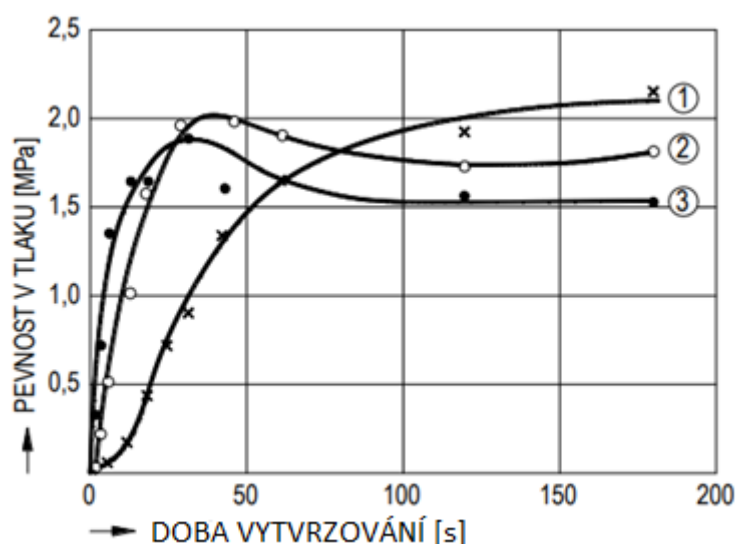
Zavedení vodního skla do slévárenského průmyslu zapříčinilo navýšení produktivity výroby odlitků. Formování směsí s vodním sklem bylo patentováno roku 1947 panem profesorem Petrželou. Vodní sklo představuje fyzikálněchemickou soustavu, jejíž vlastnosti se dají porovnat s roztokem polymerů (reologické vlastnosti – tečení materiálu při zatížení vnějšími silami) a roztokem elektrolytů (závislost hustoty, stlačitelnosti a elektrické vodivosti na koncentraci).

Hlavním údajem vodního skla je modul m , který je definován jako poměr molárních hmotností SiO_2 a Na_2O . [4, 6, 14, 18]

$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \quad (1)$$

Kromě modulu má na vlastnosti vodního skla vliv samotná výroba. Vodní sklo vzniká tavením sklářského písku se sodou a koksem. Při tavení sklářských písků, kterými jsou nejčastěji křemičité písky, je důležitá teplota tavení, množství a kvalita vody a jemnost mletí křemičitanu. Modul ovlivňuje hustotu a reaktivnost vodního skla. Vodní sklo s modulem $m = 1$ je po vysušení tvrdá krystalická hmota, s modulem $m = 2$ je částečně pružná, tuhá a sklovitá hmota a s vyššími moduly, jako například $m = 3,3$ je po vysušení drobná hmota. Při používání vodního skla jako pojiva pro formovací směsi je nejdůležitější znát: hustotu, modul a koagulační práh. [4, 6, 14, 18]

Příklad vlivu modulu vodního skla je na obrázku 1:



Obrázek 1: Vliv modulu vodního skla na průběh pevnosti směsi při vytvrzování CO_2 – čím vyšší modul, tím vyšší rychlost vytvrzování (1 – $m = 2,0$; 2 – $m = 2,5$; 3 – $m = 3,0$) [4]

Hustota vodního skla se ve slévárenském průmyslu měří za pomoci Bauméových hustoměrů a je definována jako poměr modulu k objemu. Koagulační práh určuje reaktivnost vodního skla ve formovací směsi. Vodní sklo je sodnými ionty stabilizováno, přidáním kyseliny se ovšem stabilizace narušuje a vzniká gel. Množství kyseliny, jež vyvolá koagulaci, je změřeno a nazývá se koagulačním prahem s jednotkou % Na_2O . [14]

Formovací směsi s vodním sklem lze podle vytvrzovacího procesu rozdělit na:

- **Ovládaně ztužované:** CO₂, mikrovlnný a vzduchem vytvrzovací proces vyztužování
- **Směsi samotvrdnoucí:** tvrdnoucí při exotermické reakci, tvrdnoucí bez citelné exotermické reakce²

Rozlišujeme dva postupy vytvrzování směsí s vodním sklem. Postup reverzibilní je závislý na dehydrataci (sušení studeným a horkým vzduchem, metodou Hot – Box, Cold – Box, mikrovlnné vytvrzování). Druhý postup je založen na chemickém vytvrzování (CO₂, cementem, estery) a je označován jako inverzibilní proces. [6]

2.4 Nátěry

Vysoké nároky kladené na jakost povrchu odlitků jsou hlavním důvodem, proč se na pískové formy nanáší nátěry. Stejně jako formovací směsi se nátěr skládá z několika důležitých látek, jimiž jsou výplňové hmoty, pojiva, nosné kapaliny a další přísady. Veškeré tyto složky mají v konečném důsledku vliv na vlastnosti povrchu odlitku.

Nanesením nátěru vzniká tenká vrstva mezi dutinou formy a tekutým kovem. Při styku roztaveného kovu s formou dochází k tepelným a mechanickým pochodům, které jsou zapříčiněny vzájemným působením obou složek. Z tohoto důvodu je od nátěru požadováno, aby před těmito procesy chránil celou dutinu formy. [13]

Technologické vlastnosti, jež by měl nátěr splňovat:

- Dlouhá použitelnost
- Objemová stálost při sušení (pálení)
- Minimální sedimentace
- Objemová stálost při tepelných proměnách (reakce s roztaveným kovem) – odolnost vůči vzniku trhlin
- Přilnavost k formovací směsi
- Vhodnost pro mechanizovaný způsob nanášení (hustota, jemnozrnnost plniva, viskozita) [6]

² exotermická reakce = chemická reakce, při níž se uvolňuje energie ve formě tepla

Nátěry forem a jader jsou zde uvedeny kvůli ucelení problematiky formovacích směsí. Ačkoliv se v ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. používají, tak jejich vliv, kvůli minimálnímu obsahu v regenerátu, nebyl zohledněn.

2.5 Vlastnosti formovacích směsí

Vlastnosti formovacích směsí závisí zejména na chemicko – mineralogickém složení a druhu pojiva. Všechny tyto složky dále určují, k jakému druhu formy je vhodné danou směs použít. [14]

Základní rozdělení vlastností formovacích směsí je následující:

- Fyzikální vlastnosti
- Chemické vlastnosti
- Technologické vlastnosti [14]

2.5.1 Fyzikální vlastnosti formovacích směsí

Nejdůležitějšími fyzikálními vlastnostmi formovacích směsí jsou vlastnosti tepelné. Z tepelných charakteristik jsou nejdůležitější součinitele tepelné vodivosti, teplotní vodivosti, tepelné akumulace a teplotní délkové roztažnosti.

Součinitel tepelné vodivosti - λ se u pískových forem určuje obtížně z toho důvodu, že je závislý jak na součiniteli tepelné vodivosti ostřiva, tak na vlhkosti vzduchu a plynu přítomného mezi zrny ostřiva. [4, 14]

Součinitel teplotní vodivosti - α udává, jak forma rozvádí teplotu, tj. jak snadno se ve formě vyrovnávají teplotní rozdíly.

Součinitel tepelné akumulace - b_f určuje rychlost pohlcování tepla formou, čímž zároveň udává rychlost tuhnutí odlitku. V praxi se stanovuje konstanta tuhnutí odlitku, která je závislá na materiálu kovu a formy. [4, 14]

Posledním důležitým faktorem je teplotní délková roztažnost – α . Jednotlivé složky formovací směsi se při ohřevu roztahují a při chladnutí opět smršťují. Tyto děje mají vliv na velikosti vnitřního napětí.

Dalšími fyzikálními vlastnostmi, které lze pozorovat u formovacích směsí, jsou reologické vlastnosti. Popisují chování látek za působení mechanických sil v závislosti na čase.

Patří sem například plastické a pružné deformace, které se tvoří při pěstování u jílových směsí, nebo stavy napjatosti ve formě, jež vznikají při působení tekutého kovu. [14]

2.5.2 Chemické vlastnosti formovacích směsí

Chemické vlastnosti forem jsou závislé na vzájemné kyselosti, zásaditosti, či neutralitě formy a tekutého kovu. Už při tavení vzniká v kovu struska a oxidy, které při styku s formovací směsí mohou následně vyvolat vznik dalších plynů, anebo vodní páry. Touto chemickou reakcí se tvoří produkty, které podle svých viskózních a difúzních vlastností buďto vnikají do povrchu formy, anebo jsou odnášeny roztaveným kovem. Důsledkem chemických reakcí po samotném odlévacím procesu jsou vrstvy písku, které jsou přichyceny na povrch odlitku, z něhož se musí speciálně očistit. [14]

Při odlévání zásadité slitiny do formovací směsi kyselého charakteru vznikají oxidy, které vyvolávají intenzivní penetraci (pronikání) kovu do formy. Formovací směs odolná proti penetraci musí mít chemicko – mineralogické složení ostřiva neutrální. Dalším způsobem, jak zamezit vzniku chemických dějů, je například nižší odlévací teplota kovu. [14]

Ve formách, do kterých se odlévají slitiny Fe, vznikají reakce mezi železem a vodní párou. Do reakce s vodní párou se ovšem dostávají i jiné prvky, jako např. Cr, Mn. Slitiny Fe je proto vhodné odlévat do vysušených nebo chemicky vytvrzených forem. [14]

2.5.3 Technologické vlastnosti formovacích směsí

Technologické vlastnosti formovacích směsí závisí především na vhodně zvoleném ostřivu, pojivu a dalších přísadách. Neméně důležitý je také jejich vzájemný poměr obsažený ve směsi.

Rozdělují se na:

- **Vlastnosti směsi za syrova:** mají vliv na postup výroby formy
- **Vlastnosti směsi po vysušení nebo chemickém zpevnění:** určují pevnost a kvalitu forem
- **Vlastnosti směsi během působení vysokých teplot roztaveného kovu:** ovlivňují konečnou jakost odlitku [14]

Jednou z nejdůležitějších vlastností formovací směsi je její pevnost. Ta je definována jako interakce (vzájemné působení) mezi ostřivem a pojivem.

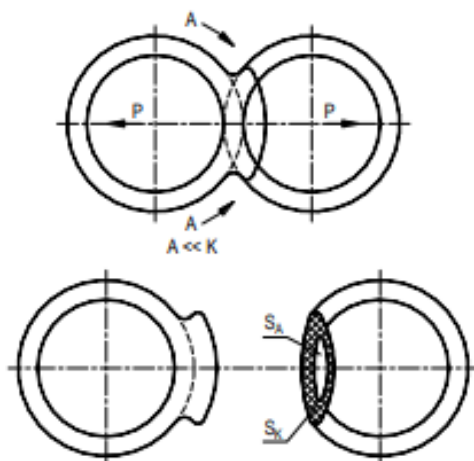
Rozlišujeme několik druhů pevnosti, a to následovně:

- **Vaznost:** pevnost směsi v syrovém stavu po zahuštění, ovlivňuje tekutost formovací směsi
- **Pevnost (primární):** získá se po vysušení, určuje manipulační pevnost forem a je výchozí pevností pro styk formy s tekutým kovem
- **Pevnost za zvýšených a vysokých teplot:** rozhoduje o poddajnosti formy (brždění odlitku při smršťování) a vzniku slévárenských vad (trhliny, vybouleniny)
- **Pevnost zbytková (sekundární):** pevnost měřená po vychladnutí formy, ovlivňuje rozpadavost forem, určuje náročnost čištění odlitku [4, 15]

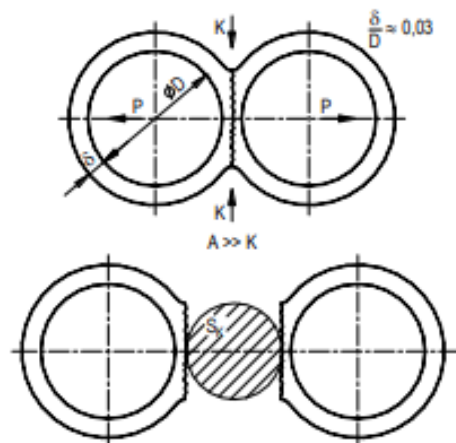
Při vysvětlení pojmu pevnost formovací směsi se vychází z předpokladu, že ostřivo má dokonalý tvar kuličky a pojivo obalí každou kuličku dokonale rovnoměrně. Mezi těmito dvěma zrny vznikne pojivový most. Síly uvnitř pojiva jsou kohezní (tvořené přitažlivými silami stejnorodých atomů) a adhezní (přilnavé – tvořené přitažlivými silami různorodých atomů). [4, 15]

Podle druhu pojiva a poměru adhezně – kohezních sil mohou nastat porušení pojivového mostu:

- **Kohezní:** přerušení pojivového mostu; mechanismus je znázorněn na obrázku 3.
- **Adhezní:** vlastní pevnost pojiva je vyšší než přilnavost a dochází k vytržení pojivového mostu; adhezní porušení je vidět na obrázku 2.
- **Adhezně – kohezní (kombinace):** kohezní a adhezní síly se od sebe neliší, vzniká lomová plocha a střídají se oba typy destrukce [4, 15]



Obrázek 2: Schéma adhezního typu destrukce [4]



Obrázek 3: Schéma kohezního typu destrukce [4]

U směsí křemenných ostřiv a vodního skla dochází zpravidla ke kohezní destrukci, u směsí s jílovým pojivem naopak vzniká destrukce adhezně – kohezní. Díky stanovení typu destrukce pojivových mostů lze ovlivnit pevnost formovacích směsí posílením nejslabšího článku vazby. U směsí s vodním sklem se chemickou, či fyzikální cestou zvyšuje pevnost zrnové obálky. Obecně platí, že – li tlustší obálka pojiva, dochází ke kohezní destrukci, u tenčích obálek dochází spíše k adhezní destrukci. [4, 15]

3. Regenerace formovacích směsí

Slévárenský průmysl se řadí mezi energeticky náročná odvětví. Dnešní společnost zároveň klade důraz na životní prostředí, z toho důvodu se čím dál více řeší regenerace formovacích směsí. V běžném provozu se snažíme získat z použité formovací směsi co největší množství ostřiva, které je po procesu regenerace nazýváno regenerátem. Pojivo se z formovacích směsí získává jen v ojedinělých případech. Například u formovacích směsí s vodním sklem lze zregenerovat křemičitan sodný. [1, 10, 19]

Hlavními důvody, kvůli kterým se regenerace formovacích směsí zavádí jsou:

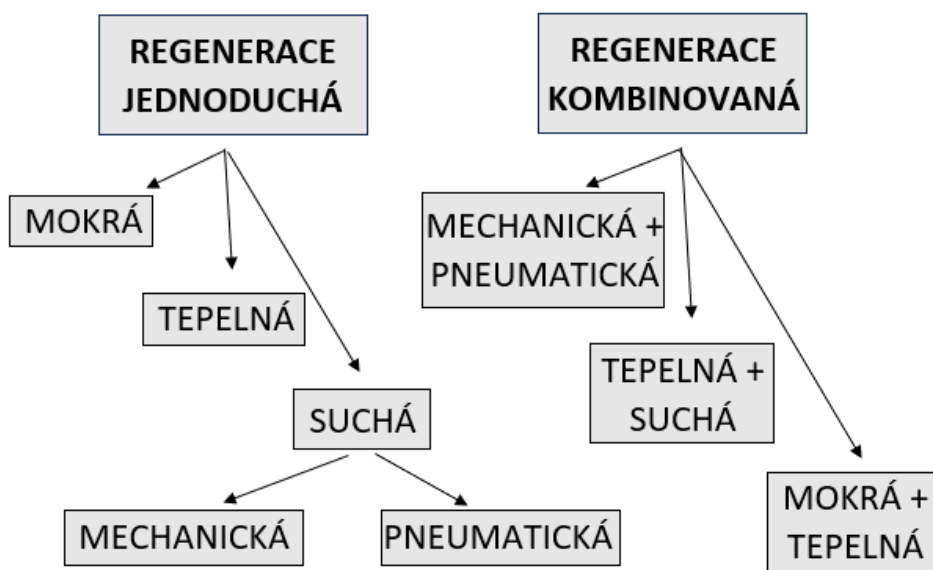
- **Ekonomické:** rostoucí cena ostřiva
- **Dopravní a manipulační:** doprava ostřiva často bývá dražší než samotné ostřivo
- **Těžební lokality:** ubývá lokalit, kde je možné těžít nové kvalitní ostřivo
- **Ochrana životního prostředí:** použitá nezregenerovaná směs obsahuje škodliviny (chemické látky) z pojiv, které znečišťují spodní vody

- **Technologické:** za použití menšího objemu pojiva dosáhne formovací směs složená z regenerátu stejných mechanických vlastností, čímž se zvýší úspora pojiva, jelikož má regenerát nižší nasákavost
- směsi s regenerátem jsou méně náchylné k tvorbě vad, a to z toho důvodu, že při regeneraci ostřiva dochází k zaoblování povrchu zrn [1, 10, 19]

Podle pojiva, které formovací směs obsahuje, se volí vhodná účinná zařízení, jež pro regeneraci využijeme. Na grafu 1. je uveden základní přehled typů regenerace.

Rozlišujeme následující druhy regenerace:

- **Jednoduchá:** mokrá, tepelná, suchá (mechanická, pneumatická)
- **Kombinovaná:** mechanická + pneumatická, tepelná + suchá, mokrá + tepelná [1]



Graf 1: Přehled typů regenerací formovacích směsí

V ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. se dříve využívala kombinace suché a mokré regenerace, proto jsou následně zmíněny pouze tyto dva typy regenerací formovacích směsí.

3.1 Suchá regenerace

3.1.1 Mechanická

Zbytky pojiva jsou z povrchu zrn odstraňovány údery a třením. Uvolněné zbytky pojiva a další nečistoty (prachové částice) jsou odsávány. Tento typ regenerace je univerzální, což znamená, že je vhodný jak pro formovací směsi s organickým, tak anorganickým pojivem.

Díky konstrukční jednoduchosti je tento typ regenerace nejméně nákladný ze všech ostatních uvedených druhů regenerace, přičemž se dá znovu využít 50 – 70 % regenerátu u anorganických pojiv a 70 – 90 % regenerátu u pojiv organických. Procentuální rozdíl mezi množstvím využitelného regenerátu je zapříčiněn adhezními silami pojiva, působícími na povrch zrna ostřiva. Směsi obsahující vodní sklo mají velké adhezní síly, a proto při odstraňování dochází k částečnému obrušování povrchu zrna. Suchá mechanická regenerace je výhodnější než tepelná regenerace i díky tomu, že po ní vnitřní povrch zůstává zablokován zbytky pojiva, a tudíž klesá nasákavost zrna a snižuje se spotřeba pojiva pro další přípravu formovací směsi. [15, 20]

3.1.2 Pneumatická

Princip pneumatické regenerace spočívá v tom, že se rozrušují zbytky obálek zrna v proudu stlačeného vzduchu vzájemným třením anebo otěrem o litinový talíř. Stejně jako u mechanické regenerace dochází k zakulacování zrn, čímž zároveň klesá jejich hranatost. U směsí s vodním sklem dochází ke zkřehnutí plastických gelů, z toho důvodu je před otěrem zařazeno sušení vratné směsi. Suchá pneumatická regenerace patří mezi vysoce ekonomické a univerzální postupy. [15]

3.2 Mokrý regenerace

Při mokré regeneraci se zbytky pojiva převedou do roztoku, který se následně odstraní praním a zůstanou pouze vlhká zrna ostřiva. Mokrý regenerace se nejvíce využívá u směsí obsahujících vodní sklo nebo bentonit. Pro bentonitové směsi je ovšem méně ekonomická. Mokrý regenerace je ekonomická tam, kde dochází ke spojení pískového i čistícího hospodářství (čištění odlitku tlakovou vodou). Samotná voda rozpouští mnoho solí ze směsi, zároveň také snižuje koncentraci Na – iontů v regenerátu, což ovšem přináší nevýhody v oblasti vodního hospodářství. Ačkoliv je využitelnost regenerátu až 85 %, je mokrá regenerace ekonomicky náročná. [15, 20]

Nevýhody mokré regenerace jsou:

- Nákladná stavba
- Náročný oběh vody, chemické a mechanické čištění
- Vysoká spotřeba vody na 1 tunu regenerátu (5 a více m³)
- Nutná tepelná izolace potrubí (ochrana proti zamrznutí)
- Nutné sušení regenerátu [15]

Ve spol. ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. se dříve prováděla kombinace suché a mokré regenerace, kdy se v části suchého okruhu regenerace využívala mechanická otírka. Po přestavbě regenerační jednotky se mechanická otírka již znovu nezapojila do procesu regenerace a v současné době se používá pouze mokrá regenerace. Odlitky, které byly odlity do formy složené z formovací směsi obsahující regenerát, který neprošel procesem suché regenerace (přes mechanickou otírku), nevykazovaly žádné jakostní nedostatky, a tudíž nebyl důvod tento typ regenerace znovu využít.

4. Experimentální část

Experimentální část byla vytvořena ve spolupráci se slévárnou ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. Cílem experimentální části bylo zjistit, zda by se mohlo zvýšit procento využívaného regenerátu při přípravě formovací směsi, aniž by to mělo negativní vliv na jakost odlitku. Dalším cílem bylo vyhodnocení kvality formovacích směsí s různým obsahem regenerátu, což vychází z provedených technologických zkoušek.

Přehled spotřebovaných komponentů:

- **Ostřivo:** Šajdíkové Humence (Šajdík – ŠH 33), Bzenec, regenerát
- **Pojivo:** vodní sklo (desil S, desil Al), bentonit
- **Tvrdidla:** diacetin, triacetin

Experimentální část bakalářské práce byla zaměřena na modelovou formovací směs, která nejvíce ovlivňuje výslednou jakost odlitku. Z tohoto důvodu se ve zkoušených formovacích směsích nevyskytuje bentonit, ani Bzenec, jelikož se v ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. tyto dva materiály používají na přípravu výplňové formovací směsi.

Bylo připraveno 5 formovacích směsí s různým poměrem nového ostřiva a regenerátu, za účelem zjištění neoptimálnější kombinace těchto složek. Poměry nového ostřiva a regenerátu ve formovacích směsích jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Poměr nového ostřiva a regenerátu ve formovací směsi

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4	Směs 5
Šajdíkové Humence	100 % 3 000 g	50 % 1 500 g	25 % 750 g	7 % 210 g	15 % 450 g
Regenerát	0% 0 g	50 % 1 500 g	75 % 2 250 g	93 % 2 790 g	85 % 2 550 g

Pět zkoušených druhů formovacích směsí se skládalo ze 3 kg ostřiva, přičemž poměr nového ostřiva a regenerátu byl různý. Formovací směs dále obsahovala 90 ml vodního skla a 9 ml esterolu. Ostřivo bylo po navážení (obrázek 4) nasypáno do žlabového mísiče

(obrázek 3), který byl pokropen vodou, aby se na něj ostřivo nelepilo. Uvnitř bylo smícháno s vodním sklem. Po uplynutí 3 minut, kdy se obě složky míchaly, byl do směsi přilít esterol. Celá směs se následně míchala 20 vteřin. Po uplynutí tohoto času byla formovací směs připravena na laboratorní zkoušky. Tento postup se opakoval u všech pěti formovacích směsí.



Obrázek 4: Vážení nového ostřiva a regenerátu



Obrázek 5: Příprava formovací směsi v laboratorním mísiči



Obrázek 6: Hotová formovací směs

Pro zjištění vlastností formovacích směsí a stanovení optimálního množství regenerátu byly provedeny následující zkoušky:

- **Stanovení životnosti formovací směsi**
- **Technologická zkouška vodního skla**
- **Granulometrický rozbor**
- **Zkouška vyplavitelných látek**
- **Sedimentační zkouška triacetinu a diacetinu**
- **Měření hustoty a viskozity vodního skla**
- **Měření vlhkosti formovacích směsí**

Pro větší přehlednost se v práci budou vyskytovat procentuálně rozdílné směsi s označením jako: Směs 1, Směs 2 atd., tak, jak je to uvedeno v tabulce 1.

4.1 Stanovení životnosti formovací směsi

Podstata zkoušky

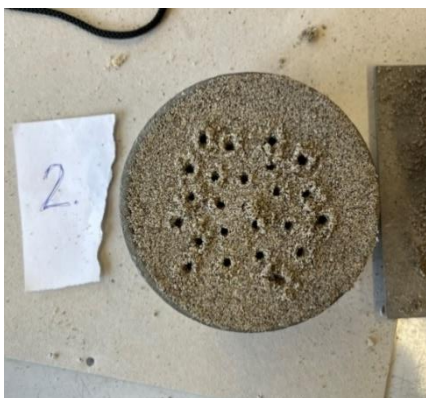
Podstatou této zkoušky bylo určit životnost formovací směsi. Životností je nazývaná doba od namíchání až po okamžik, kdy lze formovací směs zpracovávat, aniž by se porušily vazby (pojivové mosty) mezi pojivem a ostřivem. Měří se vaznost formovací směsi.

Zkušební zařízení, pomůcky a suroviny

- Jaderník (tvar trubky) $\varnothing 100 \times 60$ mm
- Příkladový přístroj na stanovení vaznosti formovací směsi PFP
- Stopky
- Laboratorní žlabový mísič
- Technické váhy s přesností $\pm 0,5$ g
- Obchodní váhy s přesností ± 10 g
- Suchý písek ŠH (Šajdíkové Humence) s $d_{50} = 0,30 \pm 0,01$ mm
- Esterol s přesně stanovenou sedimentací $4 \pm 0,1$ ml
- Voda
- Vodní sklo (90 g)
- Počítačový program „Formovací směsi“

Postup zkoušky

Připravená formovací směs (postup přípravy formovací směsi je uveden výše) byla ihned po vysypání z mísiče nasypána do jaderníku, byla upěchována a zarovnána s okrajem jaderníku, což je vidět na obrázku 7. Po zarovnání byly spuštěny stopky a v pravidelných 3 min. intervalech byla prováděna měření vaznosti. Překročila – li vaznost hodnotu $30 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$ (hodnota nastavená slévárnou), bylo možné měření ukončit a spočítat životnost směsi. Nepřekročila – li vaznost hodnotu $30 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$, bylo prováděno měření po dobu 60 min. Měření vaznosti je vidět na obrázku 8. Stanovení životnosti bylo provedeno počítačovým programem „Formovací směsi.“



Obrázek 7: Jaderník s formovací směsí



Obrázek 8: Měření vaznosti formovací směsi

Naměřené hodnoty

Tabulka 2: Vaznost formovacích směsí v závislosti na čase

Čas [min]	Vaznost s. 1 [N·cm ⁻²]	Vaznost s. 2 [N·cm ⁻²]	Vaznost s. 3 [N·cm ⁻²]	Vaznost s. 4 [N·cm ⁻²]	Vaznost s. 5 [N·cm ⁻²]
3	0,2	0,4	0,8	0,3	0,4
6	0,3	0,3	0,9	0,6	0,5
9	0,2	0,3	1,9	1,3	0,9
12	0,4	0,5	1,8	1,3	1,8
15	0,3	0,3	2,2	2,6	2,8
18	0,4	0,4	4,0	3,8	3,6
21	0,4	0,8	5,3	5,3	5,6
24	0,3	1,2	6,0	5,0	7,7
27	0,7	1,3	6,1	10,2	9,3
30	0,7	1,7	8,1	10,1	10,8
33	0,5	1,8	11,2	10,2	14,1
36	0,4	4,1	10,5	13,5	13,1
39	0,6	4,4	10,5	14,8	13,9
42	1,7	8,6	12,8	16,3	17,4
45	1,5	5,9	15,3	20,7	17,6
48	1,6	10,6	15,8	22,0	22,1
51	3,3	10,8	14,8	24,2	25,3
54	4,7	14,6	17,7	24,5	25,0
57	7,7	17,6	19,3	24,9	25,3
60	8,8	17,1	25	26,6	25,3

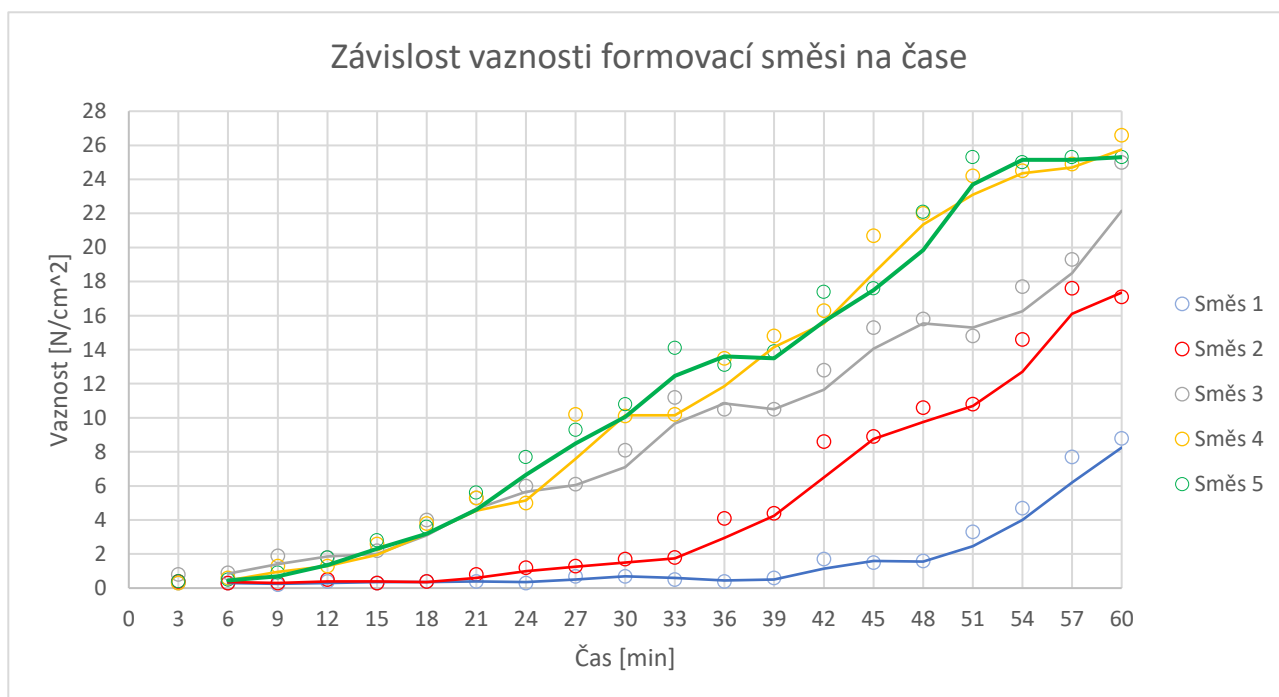
Závěr

Z programu „Formovací směsi“ byla odečtena životnost jednotlivých formovacích směsí a rychlost náběhu vaznosti.

Tabulka 3: Životnost a rychlost náběhu vaznosti formovacích směsí

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4	Směs 5
Životnost [min]	31,5	26,2	7,3	11,4	10
Rychlost náběhu vaz. [min]	0,228	0,5	0,373	0,564	0,545

Naměřená data závislosti vaznosti formovací směsi na čase jsou vidět v grafu 2.



Graf 2: Závislost vaznosti formovacích směsí na čase

Z naměřených hodnot z grafu 2 vyplývá, že nejdelší životnost má Směs 1 (100 % ŠH), se kterou lze manipulovat dlouho po namíchání (přibližně 31 minut). Nejkratší životnost má naopak Směs 3 (25 % ŠH + 75 % Reg.), tudíž je vhodné manipulovat s ní v řádech několika minut, jelikož přibližně po 7 minutách by se mohly začít porušovat pojivové mosty.

Nejpomalejší náběh má Směs 1 (100 % ŠH). Nejrychlejší náběh vaznosti má naopak Směs 3 (25 % ŠH + 75 % Reg.), což je ta s nejvyšším obsahem regenerátu. Z tabulky je možné vyčíst, že směsi s regenerátem mají mnohem rychlejší náběh vaznosti než směs obsahující pouze nové ostřivo.

4.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Podstata zkoušky

Měří se průběh vytvrzování formovací směsi s vodním sklem. Ze směsi se vyrobí normalizované zkušební válečky, na kterých se v určitých časových intervalech měří pevnost v tlaku.

Zkušební zařízení, pomůcky a suroviny

- Jaderník pro 12 zkušebních válečků a normalizovaných pěstovacích válečků o hmotnosti 367 ± 10 g
- Příklad na stanovení pevnosti v tlaku (LRU, Instytut Odlewnictwa – Kraków)
- Vibrační stůl
- Laboratorní žlabový mísič
- Elektrické váhy
- Obchodní váhy s přesností ± 10 g
- Sušící trouba s regulovatelnou teplotou do 250 °C (MORA 524)
- Suchý písek ŠH (Šajdíkové Humence) s $d_{50} = 0,30 \pm 0,01$ mm
- Esterol s přesně stanovenou sedimentací $4 \pm 0,1$ ml
- Voda
- Vodní sklo (90 g)

Postup zkoušky

Připravená formovací směs (postup přípravy formovací směsi je uveden výše) byla ihned po vysypání z mísiče nasypána do jaderníku umístěného na vibračním stole. Do každého otvoru byly vloženy pěstovací válečky a na 10 vteřin byl zapnut vibrační stůl (obrázek 9). Poté byly okamžitě odstraněny pěstovací válečky. Horní část jaderníku byla stažena bokem a byla zarovnána horní plocha zkušebních válečků. Byl zapsán čas a po 20 minutách byly válečky vyjmuty (obrázek 10) z jaderníku a byla změřena pevnost v tlaku. Následně byla měřena pevnost v tlaku (obrázek 11) po 40, 60 a 120 minutách a druhý den po 24 hodinách. Zbývající válečky byly po 24 hodinách od upěchování vloženy do trouby zahřáté na 200 °C a byly udržovány v teple po dobu 2 hodin. Po ochlazení byla změřena zbytková pevnost. Ta byla měřena jako pevnost ve stříhu, která byla podle vzorce přepočítána na pevnost v tlaku.

$$R_c = 3 \cdot R_t \quad (2)$$

R_c = pevnost v tlaku

R_t = pevnost ve stříhu



Obrázek 9: Příprava zkušebních válečků v jaderníku na vibračním stole



Obrázek 10: Vyjmutí válečků z jaderníku



Obrázek 11: Měření pevnosti v tlaku

Naměřené hodnoty

Tabulka 4: Pevnost v tlaku a pevnost ve stříhu v jednotlivých časových intervalech

Čas [min]	R _{c1} [kPa]	R _{c2} [kPa]	R _{c3} [kPa]	R _{c4} [kPa]	R _{c5} [kPa]
20	0	0	0	24 29	0
40	0 0	34 38	66 68	120 102	150 145
60	51 69	265 295	110 220	385 350	480 540
120	1480 (700)	1 460 1 300	1 350 1 180	1 520 1 420	1 220 1 550
24 [hod]	3 450 3 420	(2 550) 3 840 4 050	3 720 3 270 3 480	3 300 (2 340)	3 180 2 820
Zbytková pevnost	4 440 4 620	3 690 (2 100)	3 000 3 660	3 360 3 780	4 500 4 380

Naměřené hodnoty pevností v tlaku uvedené v závorce jsou hodnoty, které nebyly zohledněny, protože došlo k nevhodnému upnutí válečku v měřicím stroji, a tím se dospělo k chybným výsledkům.

Vlhkost formovací směsi se měřila pomocí vlhkostního analyzátoru RADWAG MA 50.R z informativních důvodů a po naměření byla zapsána do programu „Formovací směsi.“

Tabulka 5: Vlhkost formovacích směsí

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4	Směs 5
Vlhkost [%]	1,397	1,462	1,475	1,588	1,642

Příklad přepočtu pevnosti ve stříhu na pevnost v tlaku

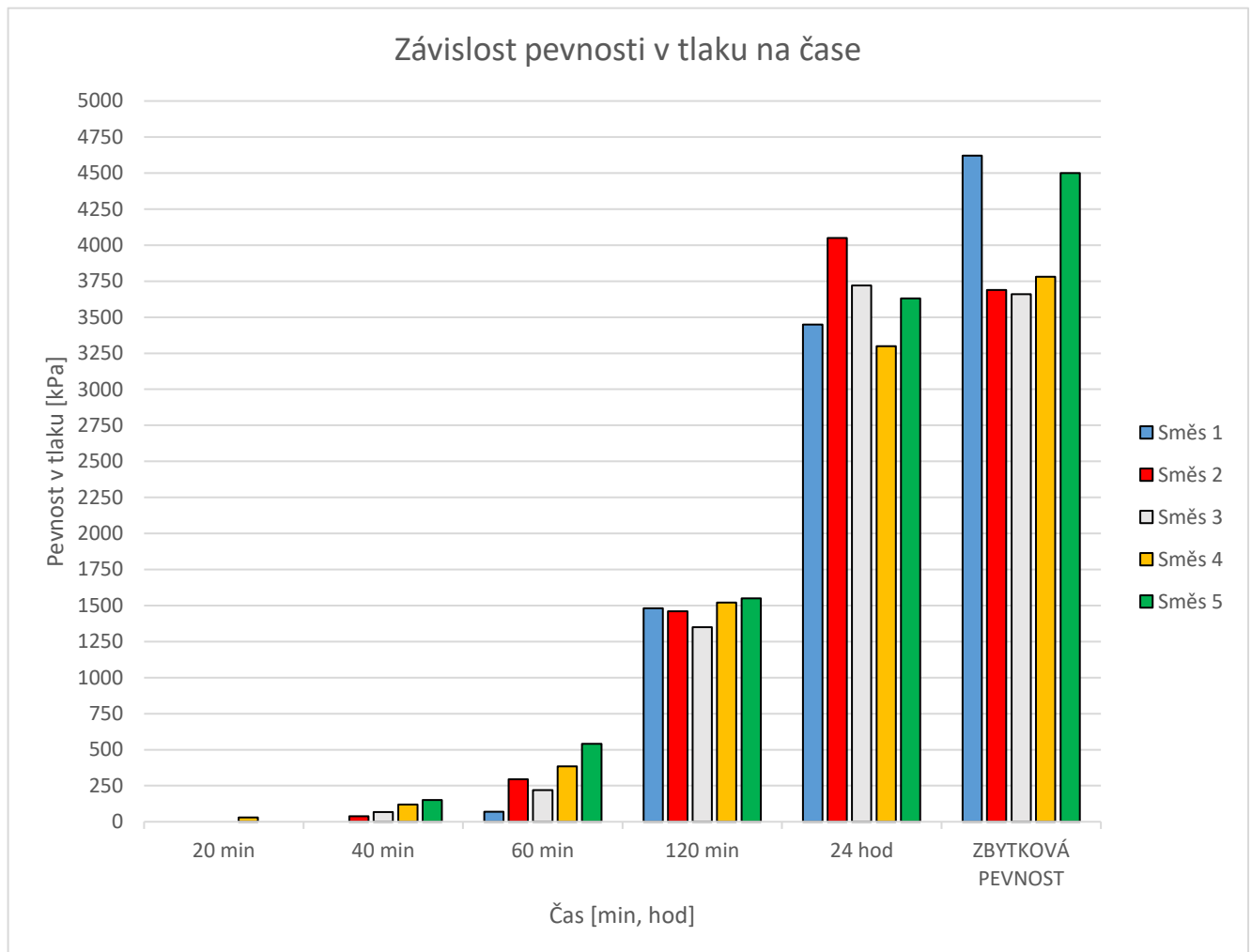
V tabulce naměřených hodnot jsou u zbytkové pevnosti uvedeny už hodnoty pevnosti v tlaku. Příklad přepočtu pevnosti ve stříhu na pevnost v tlaku je demonstrován na první směsi.

$$R_t = 1\,482 \text{ kPa}$$

$$R_c = 3 \cdot R_t$$

$$R_c = 3 \cdot 1\,482$$

$$R_c = 4\,440 \text{ kPa}$$



Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku formovací směsi na čase

Závěr

Z naměřených hodnot týkajících se vlhkosti vyšlo, že nejvlhčí ze všech formovacích směsí je Směs 5 (15 % ŠH + 85 % Reg.). Největší pevnost po 24 hodinách vykazuje Směs 2 (50 % ŠH + 50 % Reg.), což vyplývá z naměřených hodnot vnesených v grafu 3. Všechny směsi překročily hodnotu 3 000 kPa. Nejlepší zbytkovou pevnost mají Směs 1 (100 % ŠH) a Směs 5 (15 % ŠH + 85 % Reg.), jejichž hodnoty se pohybují kolem 4 500 kPa. Nejmenší pevnost naopak vykazuje Směs 3 (25 % ŠH + 75 % Reg.).

4.3 Granulometrický rozbor

Podstata zkoušky

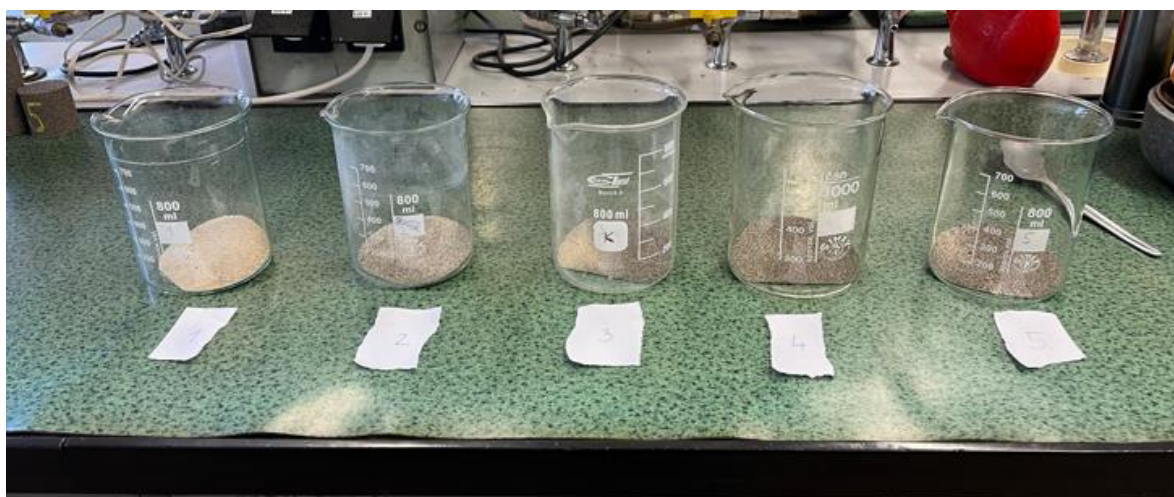
Granulometrická skladba ostřiva se zjišťuje síťovým rozbořem. Vzorek se proseje sadou sít a vážením je zjištěn podíl na jednotlivých sítích. Po sestavení součtové křivky se určí střední průměr zrn d_{75}/d_{25} . Hodnoty $d_{50/25/75}$ jsou průměry ok síta, jímž projde vždy 50/25/75 % vzorku.

Zkušební zařízení, pomůcky a suroviny

- Sada sít s velikostí ok 1,6; 0,8; 0,63; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 a 0,063 [mm]
- Přesné elektrické váhy KERN EW 600 – 2M
- Vibrační prosévací přístroj (WADAP)
- Plochý štětec
- Počítačový program „Formovací směsi“

Postup zkoušky

Od každé směsi byl navážen 100 gramový vzorek (obrázek 12). Byla sestavena sada sít, sestupně od sít s největšími oky, až po síta s nejmenšími oky. Sada sít byla umístěna na vibrační přístroj a vzorek byl nasypán na horní síto. Byl zapnut vibrační přístroj a 15 minut se nechal vzorek prosévat (obrázek 13). Po uplynutí tohoto časového intervalu byly z jednotlivých sít odebrány vzorky ostřiva a postupně se zvažily. Čištění a vážení vzorků je vidět na obrázku 14 a obrázku 15.



Obrázek 12: Vzorky ostřiva připraveného na granulometrický rozbor



Obrázek 13: Prosévání ostřiva



Obrázek 14: Čištění a odstranění ostřiva ze síta

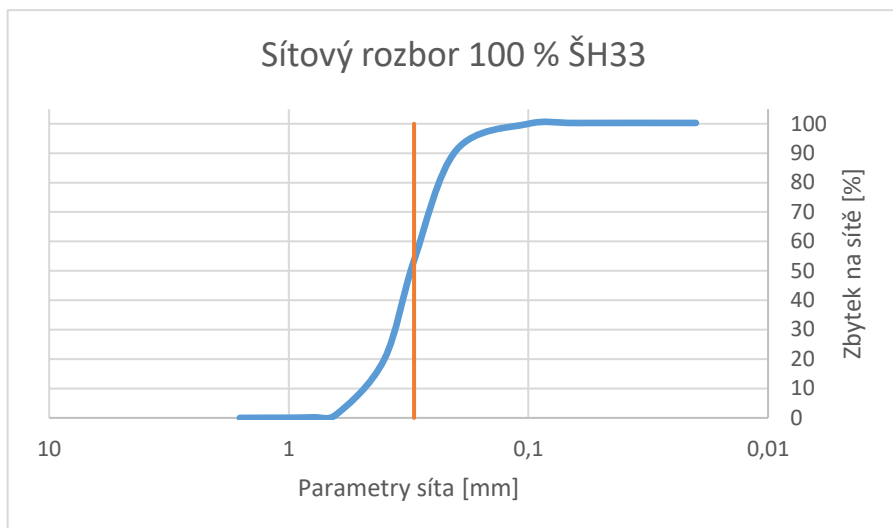


Obrázek 15: Vážení ostřiva

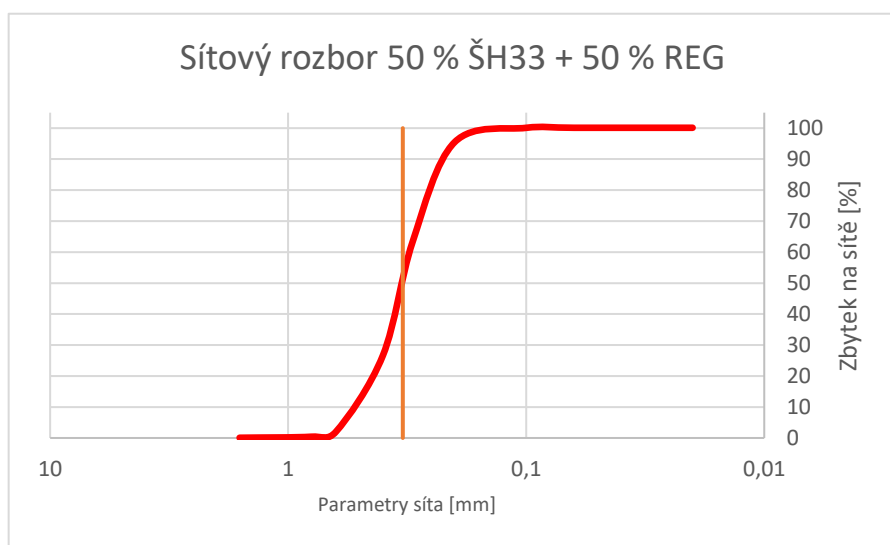
Naměřené hodnoty ze síťového rozboru

Tabulka 6: Hodnoty ostřiva zachyceného na jednotlivých sítích

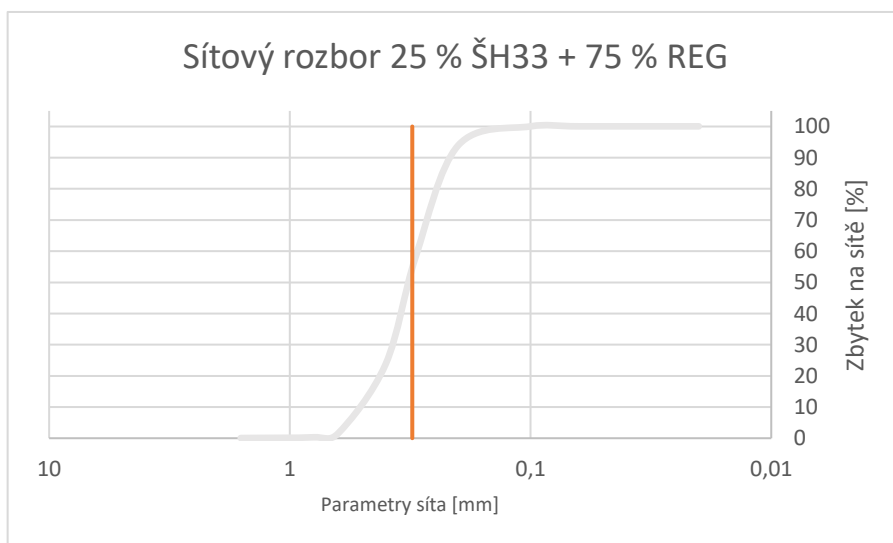
Velikost síta [mm]	Směs 1 [g]	Směs 2 [g]	Směs 3 [g]	Směs 4 [g]	Směs 5 [g]
1,6	0	0,07	0,06	0,10	0,14
0,8	0,19	0,34	0,24	0,28	0,33
0,63	1,11	1,61	1,26	1,35	1,48
0,4	18,50	24,62	22,19	23,03	24,36
0,3	33,76	36,71	34,49	34,71	37,26
0,2	37,44	32,10	35,66	34,05	30,89
0,1	9,00	4,66	6,14	6,51	5,55
0,063	0,27	0,01	0,01	0,02	0,02
Zbytek	0,012	0	0	0	0



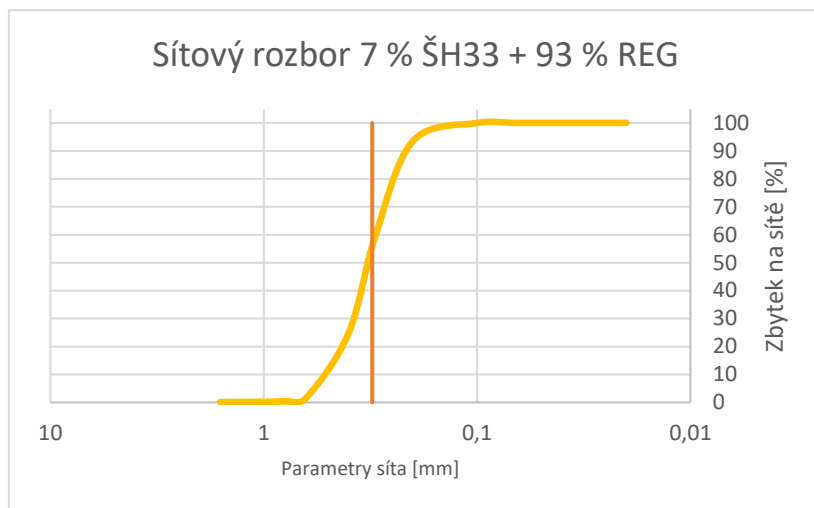
Graf 4: Sítový rozbor 100 % ŠH33



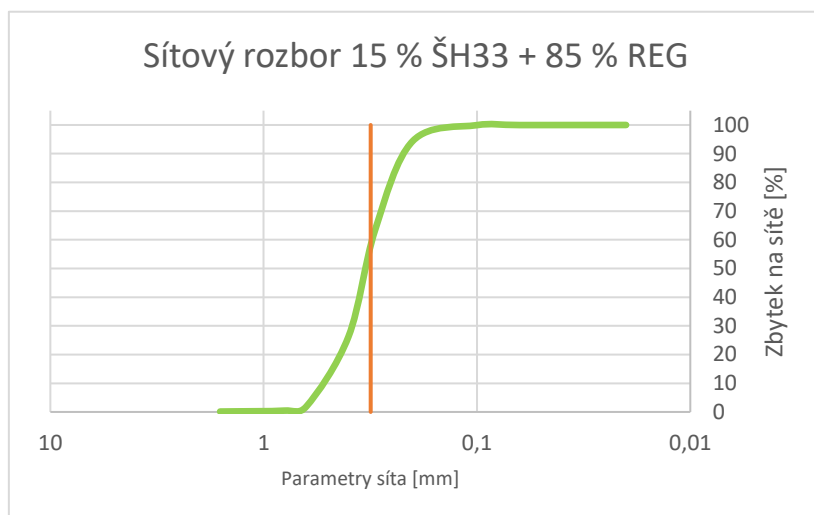
Graf 5: Sítový rozbor 50 % ŠH33 + 50 % REG



Graf 6: Sítový rozbor 25 % ŠH33 + 75 % REG



Graf 7: Sítový rozbor 7 % ŠH33 + 93 % REG



Graf 8: Sítový rozbor 15 % ŠH33 + 85 % REG

Závěr

Z naměřených hodnot a grafů 4 - 8 sítových rozborů jednotlivých ostřiv bylo zjištěno, že všechny ostřiva měla průměrnou velikost zrn mezi 0,2 – 0,4 mm. Ve všech ostřivech byl minimální podíl zrn větších než 0,4 mm, anebo menších než 0,2 mm, jejich procentuální zastoupení bylo přibližně kolem 1 – 1,5 %, což je s porovnáním s novým ostřivem vyhovující. Informace ohledně ostřiv využívaných v ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. jsou obsaženy v technických listech v přílohách.

Tabulka 7: Velikost středních zrn jednotlivých vzorků ostřiva

	d_{50} a $d_{75}/d_{25\ 1}$	d_{50} a $d_{75}/d_{25\ 2}$	d_{50} a $d_{75}/d_{25\ 3}$	d_{50} a $d_{75}/d_{25\ 4}$	d_{50} a $d_{75}/d_{25\ 5}$
d_{50}	0,310	0,336	0,324	0,327	0,336
d_{75}/d_{25}	0,640	0,630	0,638	0,638	0,637

4.4 Stanovení množství vyplavitelných látek

Podstata zkoušky

Vyplavitelné látky jsou menší než 0,02 mm. Jejich podíl ve směsi se stanoví plavením a sedimentací. Látky se z ostřiva uvolní tím, že se po zalití vodou a přidání NaOH přivedou do bodu varu a jsou míchány. Po určitém čase se vyplavitelné látky společně s vodou odčerpají a po vysušení směsi se z hmotnostního rozdílu určí množství vyplavitelných látek.

Zkušební zařízení, pomůcky a suroviny

- Kádinka o objemu 600 ml
- Vrtulkové vysokoobrátkové míchadlo (600 – 800 ot/min)
- Přesné elektrické váhy KERN EW 600 – 2M
- Laboratorní suška
- Laboratorní násoska
- 1% roztok NaOH
- Destilovaná voda
- Plynový kahan (hořák)
- Zkoušené ostřivo

Postup zkoušky

Do kádinky bylo nasypáno 100 gramů zkoušeného ostřiva. Bylo připraveno 250 ml destilované vody, do které bylo přimícháno 10 ml 1% roztoku NaOH, který byl přilít k ostřivu. Následně byl vzorek přiveden na plynovém kahanu do bodu varu a vařil se 5 minut (obrázek 16). Po vychladnutí byl vzorek 10 minut míchán za pomoci vrtulkového míchadla, což je vidět na obrázku 17. Po míchání byla opláchnuta vrtulka míchadla destilovanou vodou tak, aby se do vzorku pokud možno vrátil veškerý písek a do kádinky byla přilita vlažná voda do 600 ml. Vzorek se nechal odstát, aby se usadil veškerý písek na dně a poté byla násoskou odsáta voda ven z kádinky (obrázek 18). K písku byla opětovně přilita voda a 10 ml 1% NaOH do 600 ml a nechal se odstát. Po 10 minutách byla pomocí násosky odsáta voda a tento postup se opakoval do té doby, než se nad vzorkem objevila čirá voda. Vzorek bez vody byl vložen do trouby (200 °C) a byl vysušen. Sušení vzorků je vidět na obrázku 19. Nakonec byl suchý písek z kádinky zvážěn, což vedlo ke zjištění podílu vyplavitelných látek.



Obrázek 16: Zahřívání vzorku na plynovém kahanu



Obrázek 17: Míchání vzorku



Obrázek 18: Odsávání vody pomocí násosky



Obrázek 19: Sušení vzorku uvnitř pece

Naměřené hodnoty

Tabulka 8: Množství vyplavitelných látek v ostřivech

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4	Směs 5
Hmot. ostřiva před zk. [g]	100	100	100	100	100
Hmot. ostřiva po zk. [g]	99,83	99,76	99,66	99,5	99,67
Množ. vyplav. látek [g]	0,17	0,14	0,34	0,50	0,33

Závěr

Směsí s nejvyšším množstvím vyplavitelných látek je Směs 4 (7 % ŠH + 93 % Reg.), která podle výsledků zkoušky obsahuje 0,5 g vyplavitelných látek. Jelikož se jedná o směs s nejvyšším podílem regenerátu, dalo se předpokládat, že zde bude nejvíce prachových částic anebo zbytků pojiva, které se při zahřátí na bod varu a odsání vody vyplaví.

Nejméně vyplavitelných látek se dle naměřených hodnot nachází ve Směsi 2 (50 % ŠH + 50 % Reg.), kde bylo naměřeno 0,14 g. Překvapivé je, že ve Směsi 1 (100 %) se nachází více vyplavitelných látek (0,17 g) než ve Směsi 2 (50 % ŠH + 50 % Reg.), a to z toho důvodu, že se jedná o úplně nové ostřívo a přesto v něm je více prachových částic a jiných nečistot než v ostřivu z poloviny tvořeného regenerátem. Tento rozdíl činí ovšem pouze 0,03 g, a tudíž je ho možné téměř zanedbat.

5. Závěr

Bakalářská práce se skládá z teoretické a experimentální části. Teoretická část obsahuje popis formovacích směsí a materiálů, ze kterých se formovací směsi skládají. Jsou zmíněny především materiály, které se využívají ve společnosti ZPS – SLÉVÁRNA, a. s (vodní sklo, bentonit, Bzenec, Šajdíkové Humence) a byly použity v praktické části. Dále je zde popsána regenerace formovacích směsí.

V rámci spolupráce se spol. ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. byly provedeny zkoušky formovacích směsí a zkoušky ostřiva. Bylo namícháno pět vzorků formovací směsi s různým podílem nového ostřiva a regenerátu a bylo provedeno stanovení životnosti formovací směsi a zkouška pevnosti v tlaku. Následně byly provedeny zkoušky ostřiva, konkrétně granulometrický rozbor a stanovení množství vyplavitelných látek. Pojivem zkoušených formovacích směsí bylo vždy vodní sklo, jelikož se ve spol. ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. používá na modelovou formovací směs, která má v konečném důsledku největší vliv na výslednou kvalitu odlitku. Bentonit se používá pouze na výplňovou formovací směs.

Cílem práce bylo zjistit, zda by se mohlo zvýšit procento využívaného regenerátu a vyhodnocení kvality formovacích směsí s různým obsahem regenerátu. Po provedení všech výše uvedených zkoušek se z naměřených hodnot došlo k závěru, že nejvyšší životnost má formovací směs obsahující 100 % nového ostřiva, zároveň má také nejpomalejší náběh vaznosti. Směs obsahující 15 % nového ostřiva a 85 % regenerátu vykazovala největší vlhkost a nejvyšší zbytkovou pevnost ze všech testovaných směsí. Střední průměr zrna použitého ostřiva by měl mít dle dodavatele $0,30 \pm 0,01$ mm. Výsledky granulometrických rozborů odhalily, že do této tolerance se vejdou pouze zrna nového ostřiva. Ostatní směsi obsahující regenerát mají průměr středního zrna o 0,01 až 0,03 mm větší. Větší velikost regenerovaných zrn může být způsobena zbytky pojiva, které na zrnech zůstaly po regeneraci. Nejvyšší množství vyplavitelných látek měla směs s největším objemem regenerátu, což může být zapříčiněno přítomností prachových částic anebo také zbytky pojiva na zrnech.

V současné době se ve spol. ZPS – SLÉVÁRNA, a.s. používá poměr 25 % nového ostřiva a 75 % regenerátu. Z rešeršní části této práce vyplývá, že nejlepší vlastnosti by měla mít směs obsahující 85 % – 95 % regenerátu. Z výsledků zkoušek nejlépe vychází Směs č. 1, tedy směs obsahující pouze nový křemenný písek. Ze směsí obsahujících regenerát dosahuje nejlepších vlastností směs s 50 % nového ostřiva a 50 % regenerátu. Pouze v případě zbytkové pevnosti

se nachází na 2. místě. Nejvyšší zbytkovou pevnost po 24 hodinách má směs s 15 % nového ostřiva a 85 % regenerátu.

Hypotéza, že nejlepší vlastnosti bude mít směs obsahující 85 % – 95 % regenerátu, potvrzena nebyla. Bylo ovšem navrženo zvolit směs s poměrem 15 % nového ostřiva a 85 % regenerátu, a to z toho důvodu, že její vlastnosti jsou velmi blízké se Směsí č. 2 (50 % ŠH a 50 % REG). Jediné, v čem se výrazně liší hodnoty, je životnost směsi, která je u Směsi č. 2 přibližně o 16 minut delší.

Na základě výsledků experimentální části bylo doporučeno provedení dalších experimentů, mezi které by mohlo patřit např. odlití zkušebního odlitku v jednotlivých formovacích směsích. To by mohlo dále ukázat, jaká je kvalita jednotlivých odlitků, a tedy jaké množství použitého regenerátu má vliv na jakost odlitku či vznik trhlin a další nežádoucí deformace.

Seznam použitých zdrojů literatury

[1] PROF. ING. JELÍNEK, Petr, CSc. *DISPERZNÍ SOUSTAVY SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ: OSTŘIVA*. 6118. Ostrava: OFTIS, 2000. ISBN 80-238-6118-2.

[2] NOVOTNÝ, CSC., Doc. Ing. Jiljí, Doc. Ing. Jan ŠANOVEC, CSC., Ing. Bohumír BEDNÁŘ, CSC. a Doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSC. *TECHNOLOGIE I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. Praha: ČVUT, 2006.

[3] KRIVOŠ, E., R. PASTIRČÁK a R. MADAJ. *EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE QUALITY AND DIMENSIONAL ACCURACY OF CASTINGS MANUFACTURED BY PATTERNLESS PROCESS TECHNOLOGY*. In: . 2014, s. 1-4. Dostupné z: doi:10.2478/amm-2014-0182

[4] BEŇO, PH.D., Ing. Jaroslav, Prof. Ing. Petr JELÍNEK, CSC., DR.H.C. a Ing. Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Formovací směsi* [online]. První. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015 [cit. 2023-03-21].

[5] KAŠPAROVÁ, Ing. Eliška. *Studium vlivu různých typů formovacích směsí na kvalitu povrchu odlitků ze slitin Mg*. Praha, 2011. Diplomová. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. Vedoucí práce Ing. Barbora Bryksí Stunová.

[6] JELÍNEK, CSC., Prof. Ing. Petr. *SLÉVÁRENSKÉ FORMOVACÍ SMĚSI II. část: Pojivové soustavy formovacích směsí*. 5. Ostrava: Vlastní náklady, 1996. ISBN 80-7078-326-5.

[7] BOYLU, Feridun. Optimization of foundry sand characteristics of soda-activated calcium bentonite. In: *Applied Clay Science* [online]. Istanbul: Vlastní náklady, 2011, s. 104-108 [cit. 2023-03-08]. ISBN -. ISSN 0169-1317. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131711000597>

[8] CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY: Bentonit. *CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY* [online]. Praha: -, 2014 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/bentonit>

- [9] O společnosti. *ZPS-SLÉVÁRNA* [online]. Zlín: [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.zps-slevarna.cz/o-spolecnosti>
- [10] In situ monitoring of used-sand regeneration in foundries by impedance spectroscopy. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* [online]. Německo: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2022 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://jsss.copernicus.org/articles/11/287/2022/>
- [11] Celkový program dodávok. *KERKOSAND* [online]. Slovensko: 2020 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.kerkosand.sk/>
- [12] *Botanický průvodce okolím Bzence a lokalitou Žilkův dub* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/b2m82r/Malinkova2011.pdf>. Diplomová. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [13] SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. 1. Praha: STNL, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
- [14] RUSÍN, DRSC., Prof. Ing. Karel a kolektiv. *Slévárenské formovací materiály*. Praha: STNL, 1991. ISBN 80-03-00278-8.
- [15] JELÍNEK, CSC., prof. Ing. Petr. *Slévárenská technologie: Výroba forem a formovací materiály*. Brno: Reprocentrum, a.s., 2011. ISBN 978-80-87088-17-3.
- [16] TOMEK, Ing. Ladislav, Ing. Ivo STACHOVEC a Ing. Jana TOMKOVÁ. Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků. / [online]. /, /(/), 1-38 [cit. 2023-06-01]. ISBN /. ISSN /. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-sylabus.pdf>
- [17] JELÍNEK, CSC., prof. Ing. Petr. Anorganická pojiva si razí cestu do sléváren. *Slévárenství*. 2012, LX(3-4), 66-70. ISSN 0037-6825.

[18] BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. Recyklace slévárenských odpadů: regenerace formovacích směsí. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0682-7.

[19] JOSAN, Ana, Camelia PINCA-BRETOTEAN a Sorin RATIU. Management of the regeneration process of the moulding mixtures in order to reduce the costs of the foundry type industrial enterprises. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 45, 4161-4165 [cit. 2023-03-13]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.12.034

[20] DAŃKO, Rafał, Jozef DAŃKO a Mariusz HOLTZER. Foundry sand reclamation-theory and industrial practice [online]. (2), 623-631 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290602765_Foundry_sand_reclamationtheory_and_industrial_practic

Seznam tabulek

Tabulka 1: Poměr nového ostřiva a regenerátu ve formovací směsi.....	26
Tabulka 2: Vaznost formovacích směsí v závislosti na čase	29
Tabulka 3: Životnost a rychlost náběhu vaznosti formovacích směsí	30
Tabulka 4: Pevnost v tlaku a pevnost ve stříhu v jednotlivých časových intervalech	33
Tabulka 5: Vlhkost formovacích směsí	33
Tabulka 6: Hodnoty ostřiva zachyceného na jednotlivých sítích	36
Tabulka 7: Velikost středních zrn jednotlivých vzorků ostřiva	38
Tabulka 8: Množství vyplavitelných látek v ostřivech	40

Seznam grafů

Graf 1: Přehled typů regenerací formovacích směsí	23
Graf 2: Závislost vaznosti formovacích směsí na čase	30
Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku formovací směsi na čase	34
Graf 4: Sítový rozbor 100 % ŠH33.....	37
Graf 5: Sítový rozbor 50 % ŠH33 + 50 % REG.....	37
Graf 6: Sítový rozbor 25 % ŠH33 + 75 % REG.....	37
Graf 7: Sítový rozbor 7 % ŠH33 + 93 % REG.....	38
Graf 8: Sítový rozbor 15 % ŠH33 + 85 % REG.....	38

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv modulu vodního skla na průběh pevnosti směsi při vytvrzování CO ₂ – čím vyšší modul, tím vyšší rychlost vytvrzování ($1 - m = 2,0$; $2 - m = 2,5$; $3 - m = 3,0$) [4]	17
Obrázek 2: Schéma adhezního typu destrukce [4].....	22
Obrázek 3: Schéma kohezního typu destrukce [4].....	22
Obrázek 4: Vážení nového ostřiva a regenerátu	27
Obrázek 5: Příprava formovací směsi v laboratorním mísiči.....	27
Obrázek 6: Hotová formovací směs.....	27
Obrázek 7: Jaderník s formovací směsí	29
Obrázek 8: Měření vaznosti formovací směsi	29
Obrázek 9: Příprava zkušebních válečků v jaderníku na vibračním stole.....	32

Obrázek 10: Vyjmutí válečků z jaderníku	32
Obrázek 11: Měření pevnosti v tlaku	32
Obrázek 12: Vzorky ostřiva připraveného na granulometrický rozbor	35
Obrázek 13: Prosévání ostřiva	36
Obrázek 14: Čištění a odstranění ostřiva ze síta	36
Obrázek 15: Vážení ostřiva	36
Obrázek 16: Zahřívání vzorku na plynovém kahanu	40
Obrázek 17: Míchání vzorku	40
Obrázek 18: Odsávání vody pomocí násosky	40
Obrázek 19: Sušení vzorku uvnitř pece	40

Seznam příloh

Příloha 1: Technický list ostřiva Šajdíkové Humence

Příloha 2: Technický list ostřiva Bzenec