



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLASTNOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ ZE SMĚSNÝCH
BENTONITŮ PO OPAKOVANÉM POUŽITÍ**

PROPERTIES OF MOULDING MIXTURES OF MIXED BENTONITES AFTER REPEATED USE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vítězslav Virgl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Vítězslav Virgl**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vlastnosti formovacích směsí ze směsných bentonitů po opakovaném použití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bentonitové formovací směsi jsou nejčastěji používanou směsí při výrobě odlitků ze slitin železa, používanou jak při ruční výrobě forem tak i na automatických formovacích linkách. Bentonitové směsi při výrobě odlitků z litin obsahují uhlíkaté přísady pro zvýšení kvality povrchu odlitku. V současnosti jsou ve slévárenské praxi často používány tzv. směsné bentonity, které obsahují přímo vhodné množství uhlíkatých látek. Bentonitové směsi umožňují opakované použití a stačí směs pouze oživit bentonitem, přísadami a vodou. Výsledná jakost odlitku je dána stupněm znehodnocením bentonitů po jejich použití a způsobem oživení směsi. Použití uhlíkatých přísad v bentonitových směsích je ovlivněno též z ekologického hlediska možnostmi deponování odpadů z bentonitových směsí na skládkách.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je porovnání dosažených parametrů formovacích směsí a kvalitu povrchu zkušebních odlitků po opakovaném použití směsi. Porovnání bude provedeno u 4 receptur bentonitových formovacích směsí. Bude stanoven stupeň znehodnocení směsi u jednotlivých použitých bentonitů. Kvalita povrchu odlitku bude posouzena na základě množství ulpělé směsi na odlitcích po jejich uvolnění z forem. V rámci práce budou dále porovnány průběhy hodnot technologických vlastností formovacích směsí stanovených po určitém počtu odlitků odlévaných do dané směsi.

.
.
.
.
.

Seznam doporučené literatury:

EGEN, H.W. Grundlagen zur Steuerung der Sandzusammensetzung von bentonitgebundenen Formsand beim Aufbereitungsvorgang in Umlaufsystemen - Teil 1, Giesserei 71 (1984), Nr. 8, s. 319-325.

EGEN, H.W. Grundlagen zur Steuerung der Sandzusammensetzung von bentonitgebundenen Formsand beim Aufbereitungsvorgang in Umlaufsystemen - Teil 2, Giesserei 71 (1984) Nr. 9, s. 358-361.

NEUDERT, A. Optimalizace řízení jednotných bentonitových formovacích směsí. Brno, 2002. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.

NEUDERT, A. Řízení jednotných formovacích směsí, Slévárenství, č. 2-3, 2000, s. 90-99. ISSN 0037-6825.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Vysoká jakost formy je základní požadavek pro výrobu kvalitního odlitku. V současnosti se k nárokům na formovací materiál přidává přísný požadavek ekologů. Vhodnou variantou, která splňuje obojí, jsou bentonitové formy. Cílem práce je opakované odlití experimentálních odlitků do forem vyrobených ze čtyř směsných bentonitů. Budou porovnány dosažené technologické vlastnosti směsí, stanoven stupeň znehodnocení bentonitů a posouzena kvalita povrchu odlitků podle množství ulpělé formovací směsi.

Klíčová slova

směsný bentonit, technologické vlastnosti, aktivní bentonit, ulpělá směs, znehodnocení bentonitu, oolitizace

ABSTRACT

High class mold is required for high quality castings. At present, the demands on molding materials are being extended by adding the strict requirement of environmentalists. A suitable variant that meets both demands are green sand molds. The goal of the thesis is to repeatedly cast experimental castings into molds made of 4 types of green sand mixtures. The technological properties of the molds will be compared, the degree of bentonite degradation will be assessed and the surface quality of castings will be assessed according to the amount of adherent molding mixture.

Key words

green sand, technological properties, active bentonite, adherent mixture, dead clay, oolitization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VIRGL, V. *Vlastnosti formovacích směsí ze směsných bentonitů po opakovaném použití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vlastnosti formovacích směsí ze směsných bentonitů po opakovaném použití** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Vítězslav Virgl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D., paní Aleně Pavlicové, Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. a Ing. Vítězslavu Pernicovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji přítelkyni Zuzaně Stojanové za trpělivost a výpomoc při měření.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD	8
1 BENTONITOVÉ FORMOVACÍ SMĚSI	10
1.1 Bentonit	10
1.2 Struktura bentonitu.....	10
1.3 Natrifikace.....	12
1.4 Jednotná bentonitová směs.....	15
1.5 Uhlíkaté přísady	17
1.6 Technologické vlastnosti.....	19
1.7 Znehodnocení bentonitové formovací směsi	23
1.8 Oolitizace	25
1.9 Řízení vlastností bentonitových formovacích směsí.....	26
1.10 Použití bentonitových směsí.....	28
2 PRŮBĚH EXPERIMENTU	30
2.1 Zadání práce	30
2.2 Úvod experimentu	30
2.3 Příprava formovací směsi.....	31
2.4 Formování	33
2.5 Laboratorní zkoušky formovací směsi	34
2.5.1 Vlhkost a prodyšnost	36
2.5.2 Prodyšnost.....	37
2.5.3 Pevnosti.....	37
2.5.4 pH a elektrická vodivost	38
2.5.5 Ztráta žíháním	39
2.5.6 Množství vyplavitelných látek.....	39
2.5.7 Středová monofrakce	39
2.5.8 Stupeň oolitizace	40
2.5.9 Bentonit vypočtený	41
2.5.10 Adsorpce metylenové modři	41
2.5.11 Množství aktivního bentonitu	43
2.5.12 Obsah uhlíku a síry	43

2.5.13	Obsah lesklého uhlík.....	44
2.6	Zkušební odlitek.....	45
2.7	Příprava tekutého kovu a lití	45
2.8	Řezání odlitku a tryskání.....	48
2.9	Metalografie	51
2.10	Stupeň znehodnocení směsi.....	52
2.11	Ekologie.....	53
3	NAMĚŘENÉ HODNOTY	54
3.1	Vlhkost směsi.....	56
3.2	Prodyšnost.....	57
3.3	Pevnosti	58
3.4	pH a elektrická vodivost.....	60
3.5	Spalitelné látky.....	61
3.6	Vyplavitelné látky	62
3.7	Stupeň oolitizace	62
3.8	Obsah bentonitu	64
3.9	Obsah uhlíku a síry.....	65
3.10	Množství lesklého uhlíku	66
3.11	Vaznost formy	67
3.12	Vyhodnocení ulpělé směsi.....	68
3.13	Vyhodnocení metalografie	73
3.13.1	Mechanická penetrace.....	73
3.13.2	Chemická penetrace	76
3.14	Stupeň znehodnocení bentonitu.....	80
3.15	Ekologie.....	81
	ZÁVĚR	82
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	88
	SEZNAM TABULEK	90

ÚVOD

Produkt slévárenství – odlitek k získání svého tvaru potřebuje formu. V její dutině roztavený kov tuhne a získává podobu. Jelikož každá slitina potřebuje k dosažení požadovaných vlastností jiné podmínky, je k dispozici mnoho rozličných materiálů, které se k výrobě forem používají. První ze dvou velkých skupin jsou formy netrvalé. Z názvu vyplývá jejich jednorázové použití. Jedná se o kombinaci ostřiva (písku) a pojiva. Smícháním obou, případně dodáním dalších aditiv, vznikne formovací směs. Druhou skupinou jsou formy trvalé (nejčastěji kovové), jejichž životnost může být v řádu desítek tisíc odlití. Kvůli vysoké výrobní ceně se však hodí spíše k sériové výrobě.

V případě netrvalých forem existuje na výběr mnoho pojivových systémů. Ty jsou rozděleny do 4 generací – jílová a chemicky, fyzikálně nebo biologicky vázaná. Jílová pojiva jsou objektem zájmu této práce. Jíly využívané ve slévárenství jsou kaolinit, illit a montmorillonit. Formovací směsi s kaolinitem nebo illitem mají své specifické využití. Montmorillonit má naopak velký rozsah aplikací. Díky dobré plastičnosti, adsorpční schopnosti aj. nachází využití ve stavebnictví, chemickém průmyslu, zemědělství, a především ve slévárenství.

Pro výrobu formovací směsi se používá hornina (směs minerálů) o obsahu montmorillonitu alespoň 75 %. Nazývá se bentonit. Jeho využití ve slévárenství začalo už na počátku 20. století a pokračuje dodnes. Důvodem k jeho použití je, kromě vlastností, především cena související s velkými zásobami tohoto materiálu. Oproti novějším pojivům má horší technologické vlastnosti a obsahuje vodu, jejíž přítomnost představuje pro některé slitiny problém. Přejít k těmto novým pojivům však narazil po stránce ekologie. Zpřísnující se limity uvolňovaných nebezpečných látek vyvíjí tlak na slévárny, aby se vrátily k ekologičtějším anorganickým pojivům, mezi které se řadí i bentonit. Bohužel, ani bentonitové směsi nejsou ekologicky dokonalé. K získání kvalitního odlitku jsou do směsi přidávána aditiva. Problematický je především nosič lesklého uhlíku, který bývá přidáván kvůli kladnému vlivu na výsledný povrch odlitku.

Kromě ekologické stránky je též potřeba řešit jiný problém – znehodnocování složek směsi. Tu je potřeba doplňovat novými surovinami a likvidovat část použité směsi. Všechny tyto komplikace vedou k vývoji nových bentonitových směsí. Tuto činnost převzaly specializované firmy a do sléváren dodávají tzv. směsný bentonit, ke kterému se přidává pouze ostřivo.

V rámci této práce budou testovány 4 směsné bentonity. Na začátku bude provedena rešerše týkající se bentonitu – jeho struktury a bobtnání, díky kterému dosahuje kýžených vlastností. Dále důležitost natrifikace, přísady v směsných bentonitech, důležité parametry směsi, degradace složek, jejich náhrada novými surovinami a vhodnost použití bentonitových směsí. Experimentální část bude zahrnovat srovnání několika bentonitových formovacích směsí po vícenásobném použití. Při mísení směsi bude pravidelně odebírán vzorek, na kterém budou měřeny technologické vlastnosti směsi. Na konci experimentu bude srovnán stupeň znehodnocení směsí, přesněji jejich bentonitové složky. U odlitků

bude kontrolován povrch podle množství ulpělé směsi. Navíc bude metalograficky posouzen povrch odlitku na výskyt penetrace kovu do formy a vývin škodlivin z jednotlivých směsí.

1 BENTONITOVÉ FORMOVACÍ SMĚSI

1.1 Bentonit

Bentonit je hornina, která vznikla vulkanickou činností. Sopečný popel dopadal do vodního prostředí, kde došlo k přeměně na matečnou horninu. Ta se vlivem zvětrávání přeměnila na různé materiály, přičemž jednou z nich byl jíl zvaný montmorillonit – základ bentonitu. Podle typu vody, do které popel dopadl, vznikaly příslušné typy bentonitu. V mořské vodě vznikal přírodní sodný bentonit a v jezerních vodách vápenatý bentonit.

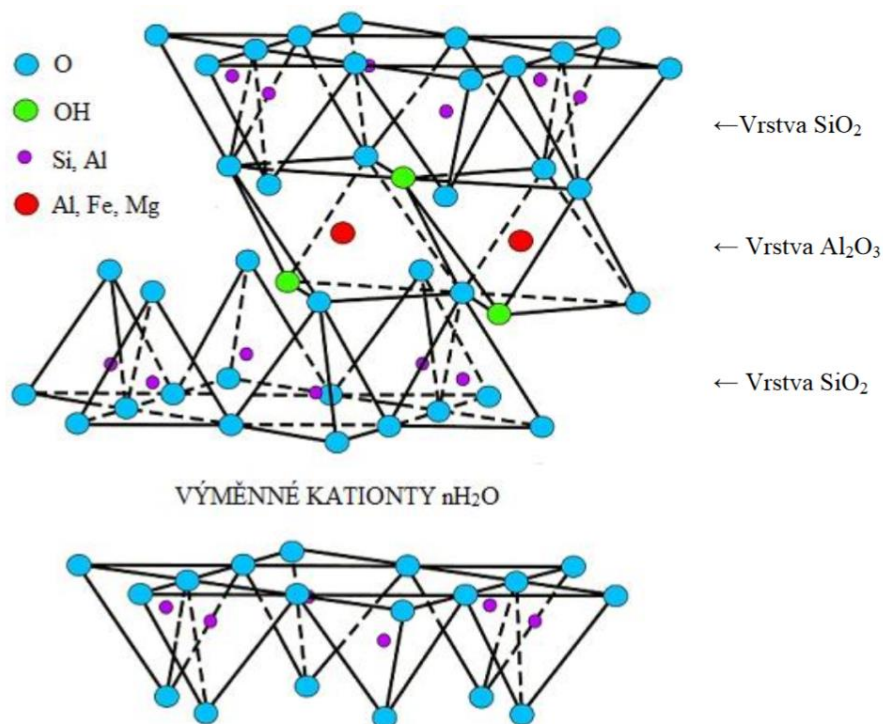
Bentonitem je nazýván materiál, který obsahuje minimálně 75 % montmorillonitu. Dalšími obsaženými látkami jsou jiné jíly (illit, kaolinit), vápenec, křemen, organické látky atd. Chemické složení se liší v závislosti na lokalitě ložiska [1].

První ložiska montmorillonitu našli francouzští mineralogové roku 1847. S jeho těžbou se ve větším měřítku začalo až na konci 19. století. Název bentonit pak získal po městě Fort Benton nacházející se poblíž naleziště. V amerických slévárnách se začal uplatňovat od roku 1920, v Evropě o 10 let později. V Evropě jsou velká naleziště v Německu, České republice (Mostecko), Polsku a Slovensku [2].

Ve slévárenství je bentonit důležitý jako pojivo k výrobě formovací směsi. V dnešní době se do těchto forem odlévá asi 50 % tonáže odlitků na světě. Jedná se o materiál s vysokými plastickými a sorpčními vlastnostmi, které mu umožňují bobtnat. Jeho použití je ekologicky a ekonomicky velmi výhodné [3].

1.2 Struktura bentonitu

Montmorillonit má trojvrstvou strukturu (Obr. 1), která je schopna bobtnat. Mezi dvěma vrstvami, které tvoří atomy křemíku tetraedricky vázané s atomy kyslíku, se nachází vrstva z atomů hliníku. Ty jsou se svými atomy kyslíku spojené oktaedricky. V rámci vrstev existují silné kovalentní vazby. Mezi vrstvami působí jen slabší van der Waalsovy síly. U montmorillonitu jsou časté vzájemné substituce atomů Si a Al (případně Mg) o rozdílných nábojích, čímž na povrchu vzniká záporný elektrický náboj. Tento jev je příčinou adsorpce kationtů, které váží sousední vrstvy zmíněnými van der Waalsovými silami. Náboj se poté snaží kompenzovat pomocí kationtů, nejčastěji jde o Ca^{2+} - Mg^{2+} , případně Na^+ [4].

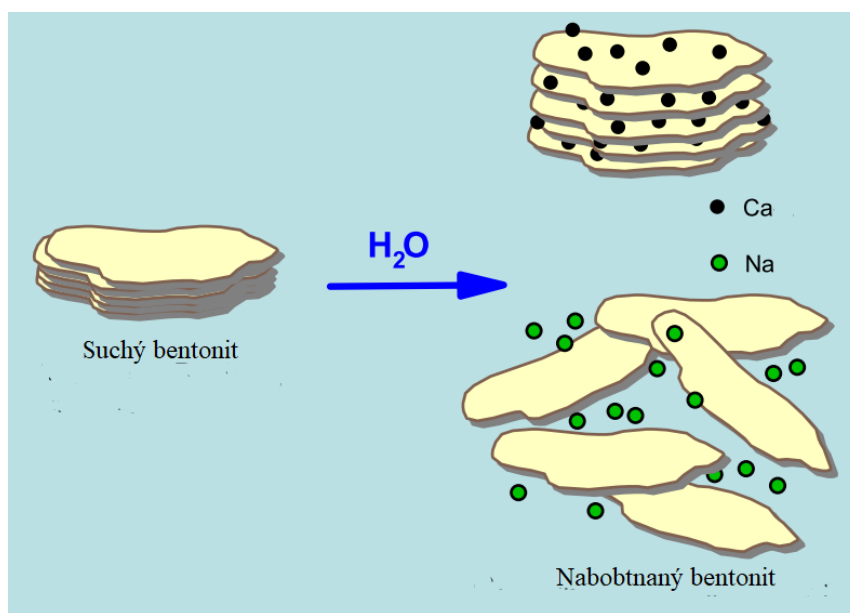


Obr. 1 Struktura montmorillonitu [5]

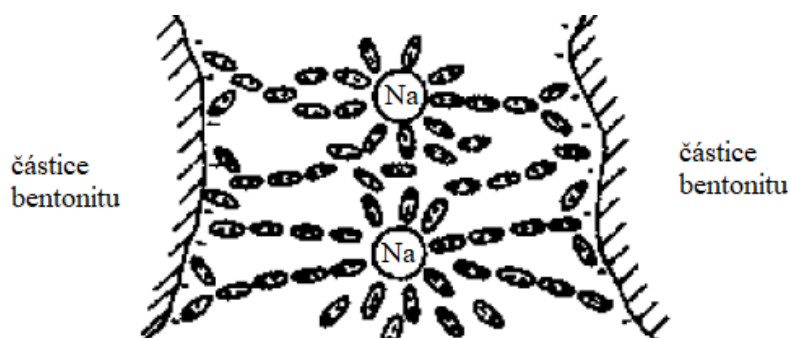
Dle místa vzniku mají různé bentonity odlišné složení. Kromě množství a typu jednotlivých jílu se rozlišují podle obsažených kationtů. První skupina zahrnuje vápník a hořčík, případně draslík. Tyto bentonity mají slabší schopnost bobtnání, a proto se částečně obohacují sodíkem. Bohužel, ani tato úprava nezvýší jejich vlastnosti natolik, aby dosáhly kvalit druhé skupiny – přírodních sodných bentonitů.

Ca-bentonit, přesněji Ca-Mg bentonit je celkově nejrozšířenější typ, jehož nemalé zásoby se nacházejí i na území České republiky. Oproti americkým Na-bentonitům nemají tak velký obsah montmorillonitu, trpí nízkou vazností a termostabilitou. To omezuje jejich použití u velkých odlitků. Důvodem je jiný způsob a množství vody, kterou dokáží vázat [3].

Schopnost bobtnat, jak již bylo řečeno, je u obou typů bentonitu rozdílná. V obou případech se jedná o hydrataci přítomných iontů, čímž se zvětšuje jejich objem a ve struktuře bentonitu tak dochází k oddálení jednotlivých vrstev od sebe, jak je vidět na Obr. 2. V případě sodné verze dochází k navázání většího množství vody, a to hlavně v mezivrstvě, což vede k ještě většímu oddálení vrstev, a tedy efektivnějšímu bobtnání – Obr. 3.



Obr. 2 Bobtnání bentonitu [6]



Obr. 3 Bobtnání Na-bentonitu [7]

1.3 Natrifikace

Jelikož výskyt silně bobtnavých Na-bentonitů je velmi skromný, a navíc pouze na území USA, je zde velká snaha přiblížit dostupnější Ca-Mg bentonit jeho vlastnostem jinou cestou. Jedná se o výměnu iontů Ca za jiné ionty. Dle schopnosti výměny kationtů $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ se nejlépe jeví lithium. Vzhledem k jeho vysoké ceně byl ale vybrán sodík [4].

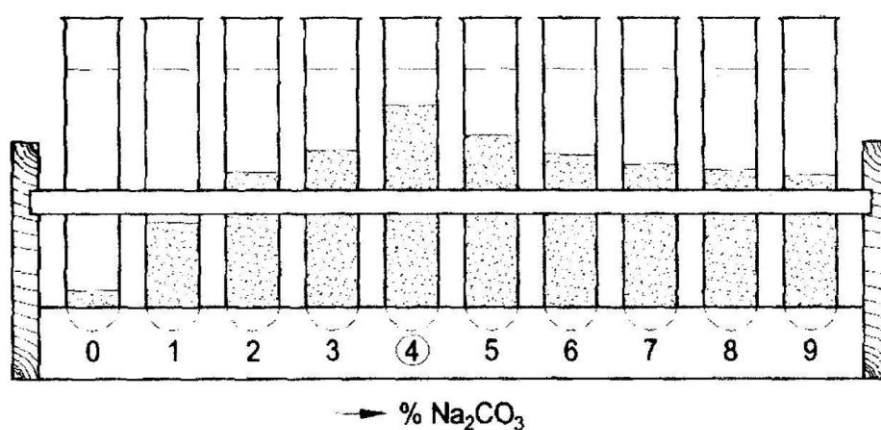
Procesem natrifikace se tedy rozumí náhrada iontů Ca^{2+} za Na^+ . Ta se nejčastěji provádí použitím sodných solí – uhličitanu sodného (1.1):



Dávkování natrifikačního prostředku má určité meze. Nedostatek i přebytek způsobí pokles bobtnavosti. Volba optimálního množství Na_2CO_3 závisí na potřebách konkrétní

slévárny, kde bude bentonit využíván. Vliv má především používaná jádrová směs, tepelné namáhání formy, tvrdost vody aj. [4].

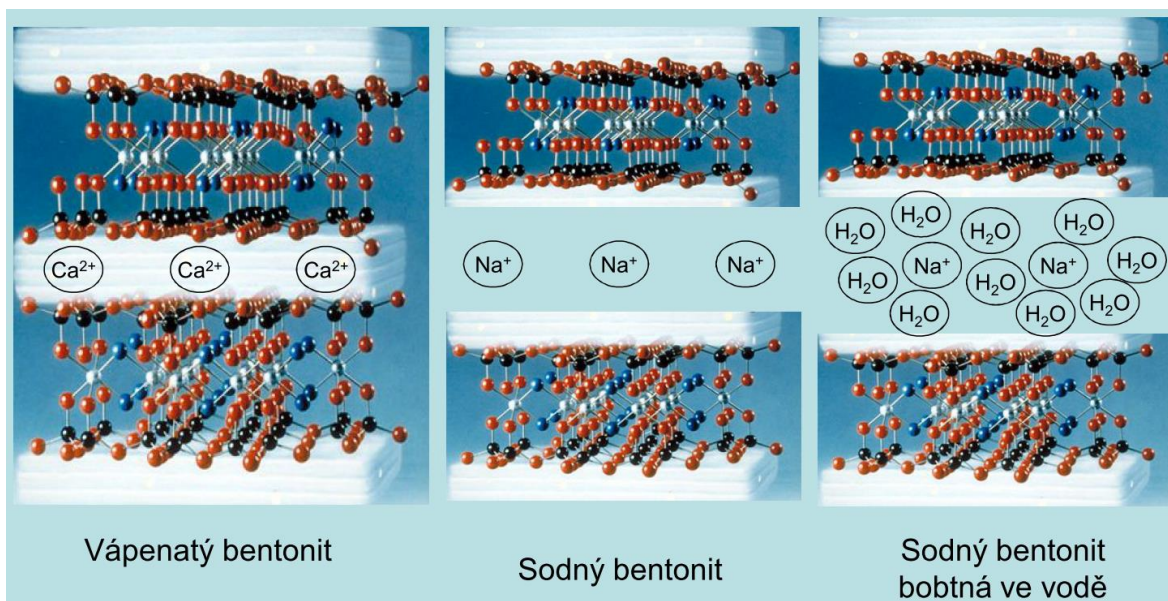
K nalezení správné natrifikace se zkouší bobtnavost bentonitu. Metoda podle E. Hofmanna spočívá v testování různě natrifikovaných dávek směsi viz Obr. 4. Nejplnější zkumavka značí nejvyšší míru bobtnání, a tedy optimální množství uhličitanu sodného [3].



Obr. 4 Test bobtnavosti dle E. Hofmanna [3]

Zkouška nasákavosti zkušebního válečku, kapková zkouška aj. jsou metody, které pouze informují, zda je bentonit natrifikovaný či ne. Jsou ale velmi rychlé a nepotřebují prakticky žádné laboratorní vybavení.

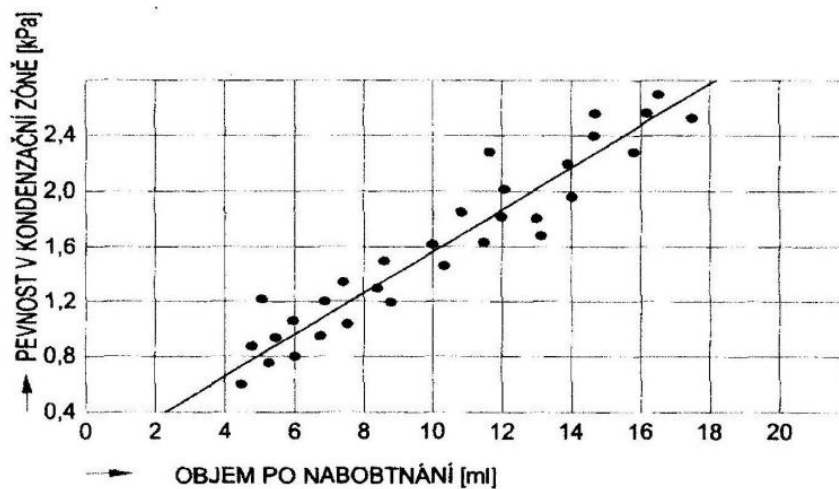
Voda se v Na-bentonitu spotřebovává nejen na bobtnání povrchu částic, jako u Ca bentonitu, ale také mezi jednotlivými vrstvami (Obr. 5). Díky tomu je bentonit schopen pojmout více vody, více bobtnat, a tak navyšovat své technologické vlastnosti [4].



Obr. 5 Rozdíl mezi Ca a Na bentonitem [6]

Důsledky zvýšené bobtnavosti [3]:

1. nárůst pevnosti v kondenzační zóně (vzrůstá se zvyšujícím se objemem bobtnání viz Obr. 6),
2. zvýšení vaznosti (pevnosti v tlaku),
3. pokles tepelného napětí formy z tepelné dilatace,
4. vyšší termostabilita (plastické vlastnosti degradují až za vyšších teplot),
5. vyšší sorpční vlastnosti (mimo jiné sorpce nebezpečných plynů).

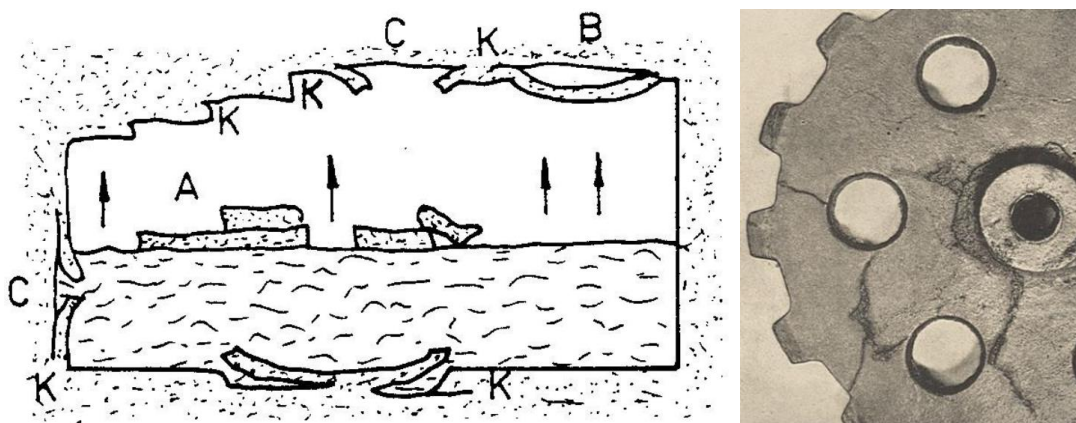


Obr. 6 Závislost pevnosti v kondenzační zóně na schopnosti bobtnat [3]

Naproti výhodám existuje stinná stránka natrifikace – vyšší oolitizace zrn ostríva, obesychání forem, horší rozpadavost nebo riziko denatifikace působením solí z vody a zbytků jádrových směsí. Výhody natrifikace však silně převyšují její negativní stránky [3]. V dnešní době se ve slévárenském průmyslu České republiky používá výhradně natrifikovaný (tzv. aktivovaný) bentonit.

Natrifikace je velmi důležitá pro již zmíněnou pevnost v kondenzační zóně (PKZ). Zvýšením této pevnosti se zabráňuje vzniku zálpů (Obr. 7) – množství formovací směsi uvězněné pod povrchem odlitku. Odpadá část formovací směsi vznikne vlivem sálání tepla z taveniny. Přesněji dochází k tepelné dilataci směsi a zároveň ke vzniku převlhčené zóny o horších mechanických vlastnostech, než má zbytek formy. Tím dochází k porušení celistvosti stěny a utržení materiálu. Tato nadměrně vlhká oblast se nazývá kondenzační zóna, neboť se sem vlivem tepla přemísť vlhkost ze směsi, která se nachází blíže odlitku.

Pevnost v tomto místě je u natrifikovaných bentonitů 2-3x vyšší, než u vápenaté verze [8]. Díky tomu se zálpupy vyskytují pouze ojediněle – při extrémní tepelné zátěži, špatném dávkování Na_2CO_3 nebo denatifikaci [6].



Obr. 7 Různé druhy zálpů (vlevo) [8], zálp na odlitku (vpravo) [9]

1.4 Jednotná bentonitová směs

Bentonitová formovací směs, jak již bylo uvedeno, není pouze voda, bentonit a ostrívo. Obsaženo je i množství přísad, jejichž cílem je zlepšit výslednou kvalitu formovací směsi a odlitků. Jde zejména o podporu nasákavosti, bobtnavosti, technologických vlastností, povrchu odlitku, snižování emisí atd. Jmenovitě se jedná o tyto přísady a efekty [10]:

1. Sacharidy (převážně škrobové látky)
 - drží vodu – snižují obesychání formy
 - zvyšují houževnatost směsi – bezpečnější vyjímání modelu

- zvyšují odolnost vůči erozi
 - vypomáhají v převlhčené kondenzační zóně jako „lepidlo“
2. Oxidační přísady (směs vody s ozonem a peroxidem vodíku)
- aktivuje nosiče uhlíku – snižují množství emisí benzenu
3. Grafit
- zlepšuje tekutost směsi při nízké vlhkosti
 - zrychluje bobtnání
 - snižuje optimální vlhkost směsi
 - snižuje výskyt připečení
 - zlepšuje využitelnost nosiče lesklého uhlíku
 - zvyšuje pevnost v kondenzační zóně
4. Dřevěná moučka [11]
- zmenšuje objemové změny směsi při tepelném ovlivnění
 - vytváří redukční atmosféru ve formě
 - snižuje výskyt trhlin za tepla
 - zvyšuje tekutost formovací směsi
5. Uhličitan sodný – natrifikace
6. Nosiče lesklého uhlíku – více v následující kapitole
7. Další přísady – látky nahrazující uhlí či jiné nosiče lesklého uhlíku

Kromě nich se ve směsi nachází množství nechtěných látek, jako tepelně degradované pojivo a přísady, produkty chemického rozkladu aditiv, zbytky jader a kovu, soli ze záměsové vody, oolitické obálky na zrnech ostřiva a další. Všechny tyto složky se navzájem ovlivňují a vytváří specifické vlastnosti formy, čímž ovlivňují výslednou kvalitu odlitku [12].

V minulosti byly připravovány 2 směsi – modelová a výplňová. První z nich dosahovala vyšších technologických vlastností a dobře odolávala tepelnému zatížení. Byla aplikována přímo na model. Výplňová směs sloužila k doplnění formy ve zbývajícím prostoru rámu. Dnes se používá jednotná formovací směs, která má v celém objemu formy stejné vlastnosti. Tato takzvaná jednotná bentonitová směs je nejčastěji používaným typem formovacích směsí pro odlitky z litiny a slitin hliníku. Odhaduje se, že více jak 70 % z celkové výroby litinových odlitků je formováno touto technologií [12].

V slévárnách se nejčastěji používá tzv. směsný bentonit. Jde o předpřipravenou směs bentonitu s aditivy, ve které prakticky chybí pouze ostřívo. Dodavatelé ji dokáží připravit přesně podle požadavků slévárny, čímž se ušetří čas a peníze. Zápornou stránkou je obtížná změna složení směsi, a to zejména při obměně vyráběného sortimentu. Směs je pak namáhána jiným způsobem a vzniká odlišné množství znehodnocených složek než původně. Lze sice dopředu plánovat skladbu nové formovací směsi s dodavatelem, ale žádná slévárna nevyřadí veškerou dosavadní směs, kterou má právě v oběhu. Zjistit správné hodnoty nově nastavených parametrů ožívování je též dlouhodobá záležitost [13].

1.5 Uhlíkaté přísady

Ke zlepšení kvality povrchu litinových odlitků se přidávají do bentonitových směsí uhlíkaté přísady. Jejich přesné funkce jsou následující (Obr. 8) [3]:

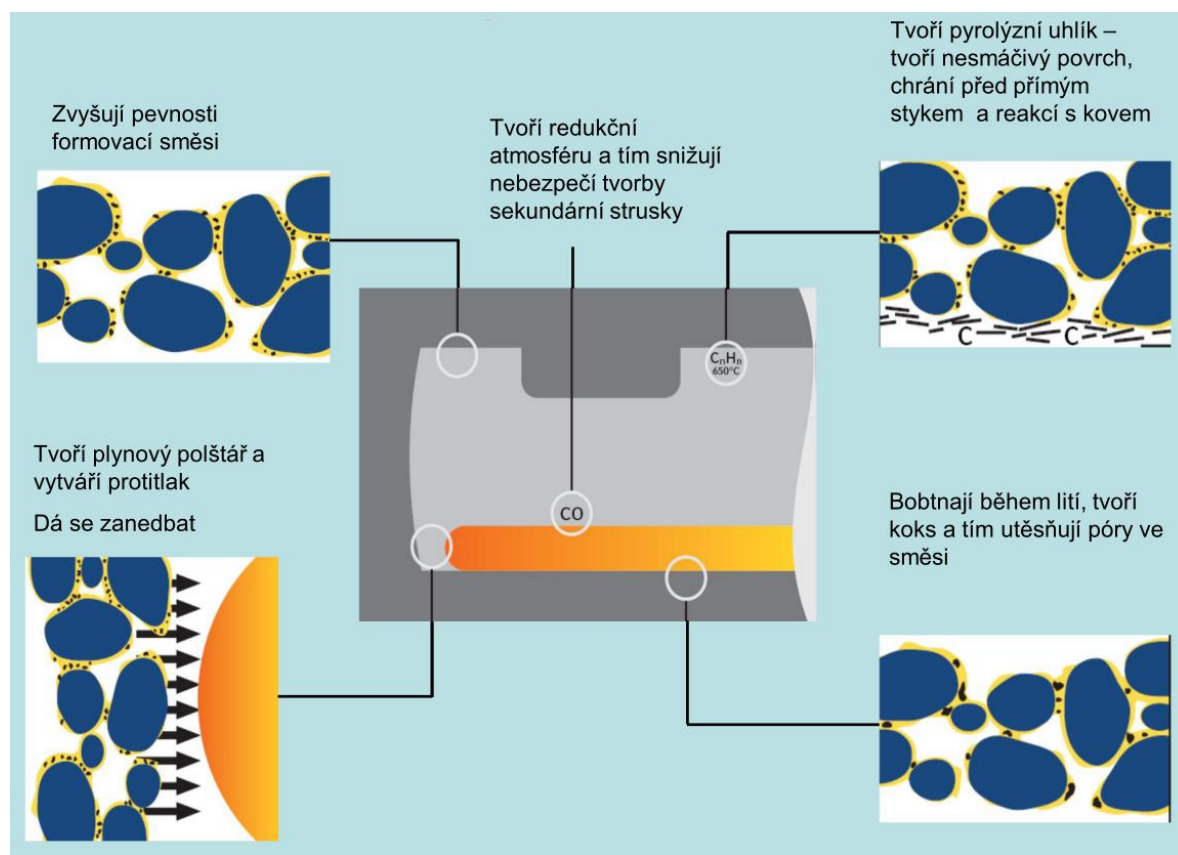
1. tvorba „lesklého uhlíku“ (Obr. 9),
2. vznik redukční atmosféry,
3. „plynový polštář“,
4. vznik koksu,
5. zpevnění formovací směsi.

Během lití se forma zahřívá. U uhlíkatých látek přitom dochází k pyrolýze, tzn. tepelnému rozkladu bez přístupu kyslíku. Uvolňují se plyny, které se usazují na povrchu zrn ostřiva. Vytváří zde tenký, vysoce adhezivní grafitický povlak. Tato vrstva obsahuje velké množství lesklého uhlíku. Povlak je tekutým kovem nesmáčivý, čímž se snižuje nebezpečí penetrace kovu mezi zrna ostřiva [14].

Kvůli nedostatku kyslíku v pórech formy dochází k nedokonalému spalování. Produktem je oxid uhelnatý, který ve formě vytváří redukční atmosféru. Ta eliminuje přítomný vzdušný kyslík a brání tak vzniku FeO, který by jinak reagoval s křemenným ostřivem za vzniku nechtěného fayalitu – viz chemická penetrace.

Vznikající plyny plní také další funkci – vytváří protitlak (plynový polštář). Ten působí proti metalostatickému tlaku kovu a zabraňuje tavenině v pronikání mezi zrna ostřiva.

Produktů pyrolýzy je více. Kromě plynů vznikají i pevné látky – například koks. Ten postupně měkne a bobtná. Díky těmto vlastnostem zaplňuje prostor mezi zrny a obaluje je. Takto brání průniku kovu do formy a obal plní ochrannou funkci před interakcí ostřiva s taveninou. [3]



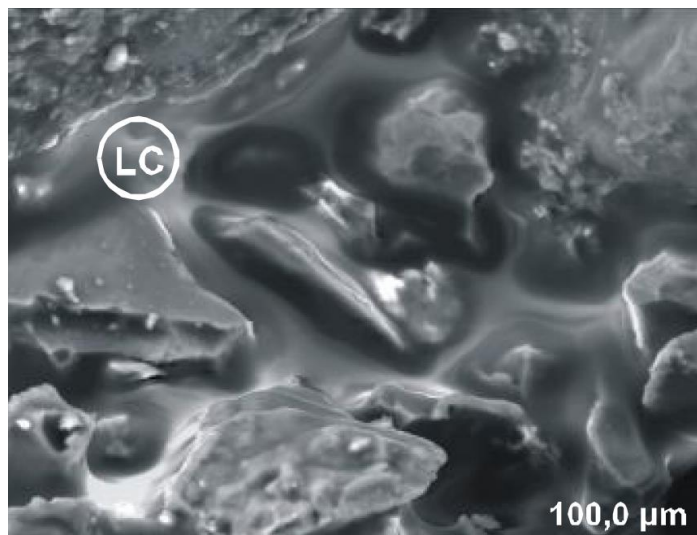
Obr. 8 Funkce lesklého uhlíku [6]

Jako „nosič“ lesklého uhlíku (zkráceně LC) se nejčastěji užívá kamenouhelného uhlí nadrceného na moučku. Důvodem je především vysoký obsah látek schopných tvořit LC, index puchnutí (schopnost bobtnat) a nízká cena. Naopak problematické složky uhlí mohou být obsah síry (dostává se do kovu), popela a těkavých látek (ekologie). Množství obsažených složek se odvíjí od naleziště uhlí [15].

Jako alternativu k uhlí lze zvolit umělé pryskyřice nebo modifikovaný přírodní asfalt. Dříve užívané oleje či dehet jsou z ekologických důvodů zakázány [6]. Uhlíkaté látky též nejsou dokonalé. Problematická je především tvorba látek skupiny BTEX, které jsou pro zdraví velmi škodlivé. V první řadě se uvolňují v prostředí slévárny formou plynů, které jsou zdraví nebezpečné. Tento problém lze eliminovat přísadami, které tyto látky pohlcují. V takovém případě ale vzniká odpad, který se namísto dalšího využití musí likvidovat. Složitě je i skladování a transport uhlíkatých přísad. Jelikož jsou tyto látky při určité koncentraci se vzduchem samovznětlivé až výbušné, je nutno dodržovat přísné bezpečnostní předpisy [13].

Z těchto a dalších důvodů se hledají náhrady uhlíkatých látek. Jako možná alternativa přichází v úvahu makrokrytalický grafit. Cenově jde však o velmi nákladnou volbu. O něco výhodněji vypadá kombinace grafitu s klasickou uhlíkatou přísadou. Další variantou je využití sazí, které vznikají při tvorbě oolitizované obálky na ostřivu.

Nejčastější cestou je ale používání aditiv schopných absorbovat produkované škodliviny a minimalizovat riziko exploze [16].



Obr. 9 Mikroskopický snímek lesklého uhlíku na povrchu zrn ostřiva [13]

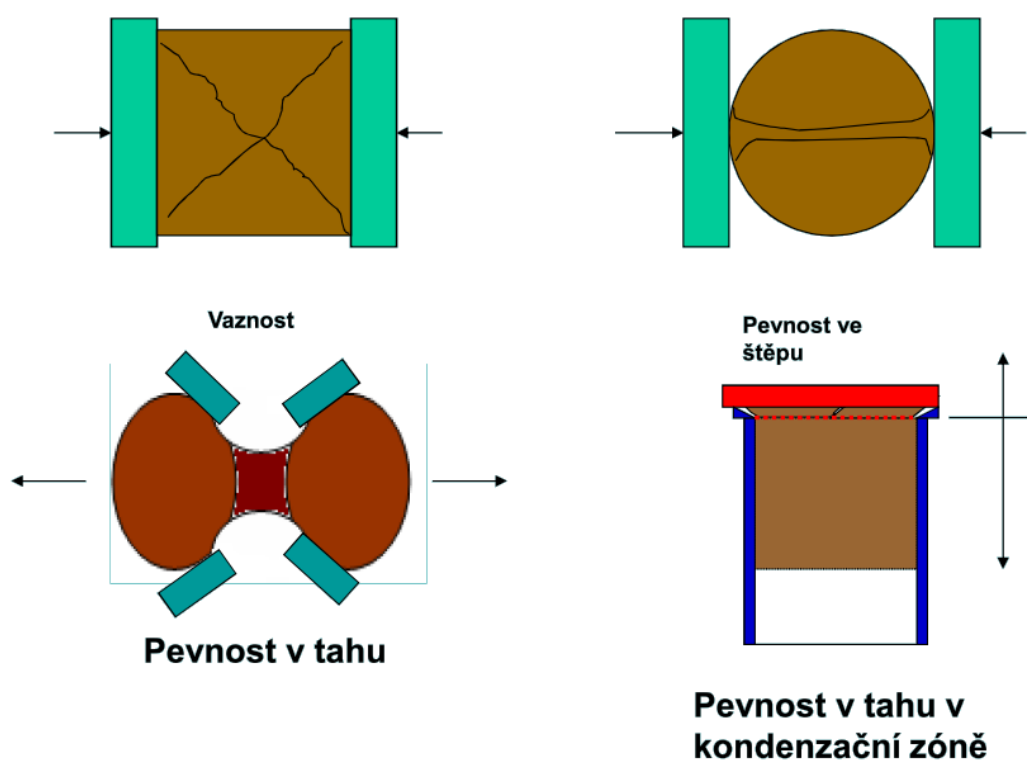
1.6 Technologické vlastnosti

Na bentonitové směsi jsou kladeny nároky, které musí splňovat, aby se daly využít jako formovací směs pro výrobu slévárenské formy. Mezi požadované technologické vlastnosti se řadí především [3]:

- pevnost v tlaku za syrova (vaznost),
- pevnost ve štěpu,
- pevnost ve stříhu,
- pevnost v kondenzační zóně (PKZ),
- prodyšnost,
- spěchovatelnost.

Další důležité vlastnosti, které je u směsi potřebné hlídat, jsou vlhkost, množství vyplavitelných látek, obsah aktivního bentonitu (pomocí adsorpce metylenové modře), spalitelných látek a těkavých látek a stanovení obsahu pyrolýzního (lesklého) uhlíku. Vybavení k měření pevnosti v kondenzační zóně nebo stanovení obsahu lesklého uhlíku má ale jen málo sléváren [3].

Hodnoty pevností bentonitové formy jsou ukazateli toho, jakému fyzickému namáhání forma v syrovém stavu odolá. Zátěž představuje především manipulace s formou a odlévání. Pevnosti závisí na mnoha faktorech. Například na obsahu pojiva, vlhkosti nebo způsobu zhutňování směsi. Hodnoty vaznosti se správně pohybují v rozmezí 90-230 kPa dle způsobu formování [3]. Pro měření pevností se ze směsi vytváří zkušební válečky o průměru 50 mm a výšce též 50 mm. Podle způsobu zatížení se testují dané vlastnosti (Obr. 10) [17]:



Obr. 10 Měření pevnostních vlastností směsi [6]

Pevnost v tlaku se měří také po vysušení při určitých teplotách. Tímto se simulují parametry směsi po odlití. Zjištěné hodnoty slouží k nastavení síly vytlučovacího zařízení.

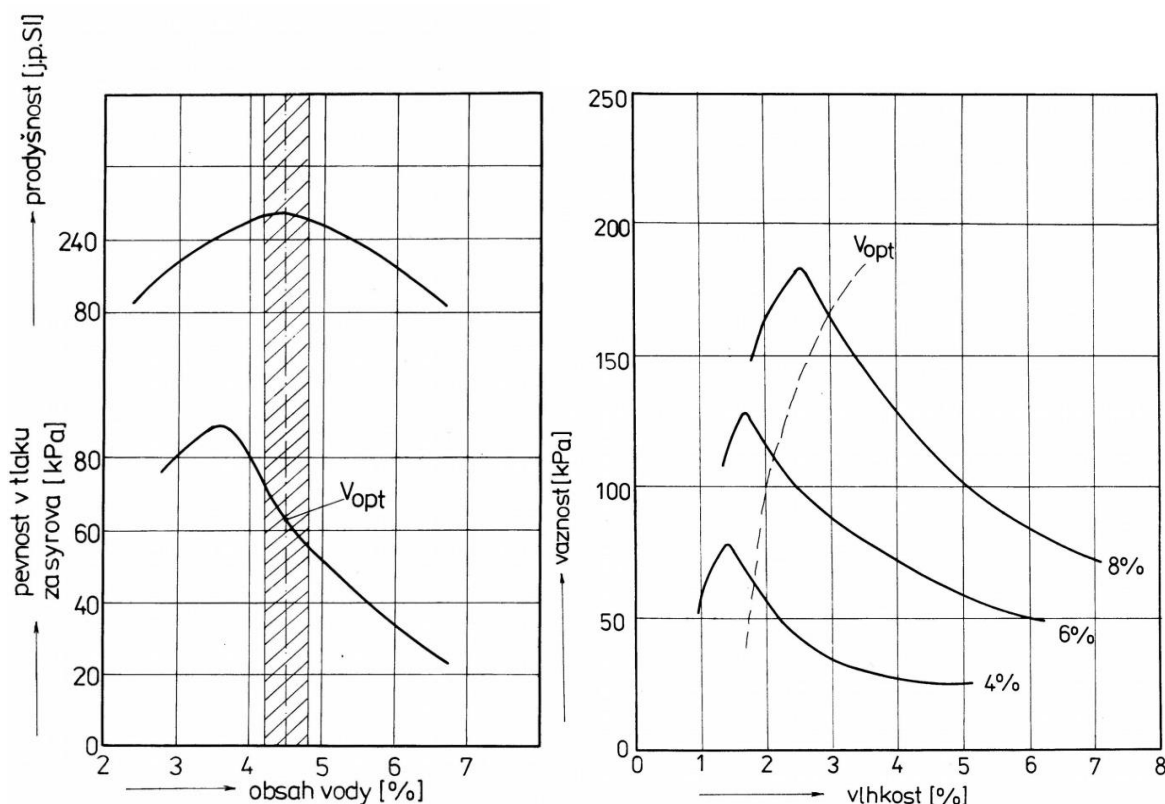
Při lití tavenina prohřívá formu. Stěny v kontaktu s tuhoucím odlitkem jsou vystaveny velkému tepelnému zatížení, v jehož důsledku se z nich odpařuje voda. Dále od stěny je tepelné ovlivnění menší a odpařená voda zde kondenzuje. Rozdíl vlhkosti v kombinaci s tepelnou dilatací formy (především zrn ostřiva) může způsobit uvolnění suché vrstvy směsi, a tím vznik slévárenské vady – zá lupů. Z tohoto důvodu je nutno řešit pevnost směsi v tomto místě – tzv. kondenzační zóně. Pevnost v kondenzační zóně (zkráceně PKZ) se měří na specifických přístrojích vyrobených přesně pro tento účel. Váleček směsi je na jednom konci zahříván na vysokou teplotu a následně namáhán tahem. Pevnost v kondenzační zóně lze navýšit těmito způsoby [3]:

1. natrifikací bentonitu,
2. zkrácením doby sálání tepla (nižší teplota lití, kratší doba lití, reflexní nátěry),
3. mechanickým zpevněním (použitím pískováčků),
4. snížením dilatačních pnutí (jiné ostrívo, bentonit) [1].

Prodyšnost je důležitá vlastnost směsi, díky které je forma schopna odvádět plynné produkty vzniklé během lití. Nemožnost unikát by mělo za následek vznik vad v odlitku. Prodyšnost se měří v tzv. jednotkách prodyšnosti (j. p.). Na starších měřicích strojích lze nalézt stupnici v „normálních jednotkách prodyšnosti“, která se na nové jednotky přepočítává vztahem $1 \text{ j. p.} = n. \text{ j. p.} \cdot 1,67$.

Hodnota optimální vlhkosti je taková, při které dosahuje formovací směs maximální prodyšnosti (Obr. 11). Přesná hodnota závisí na surovinách použitých při přípravě formovací směsi. Vliv má jak typ použitého bentonitu, tak i jeho množství. Ideální hodnota vlhkosti se pohybuje v rozmezí 2,5-3,5 %. Vysoké množství vody se nepříznivě projeví na kvalitě odlitku.

Změnou obsahu pojiva se kromě optimální vlhkosti mění i vaznost směsi. Na pravém grafu Obr. 11 je znázorněn průběh vaznosti pro obsahy bentonitu ve směsi 4, 6 a 8 % [3].



Obr. 11 Závislost vaznosti a prodyšnosti na vlhkosti (vlevo), vaznosti na vlhkosti dle obsahu bentonitu [3]

Při zvyšujícím se obsahu bentonitu ve směsi roste také množství vody nutné pro získání maximální prodyšnosti. Potřebný obsah vody ovlivňuje též použité ostřívo. Malá a porézní zrna spotřebují při obalování více vody než velká zrna s hladkým povrchem, protože nasycení povrchu a pórů zrn ostřiva vyžaduje více bentonitu, a tedy i vody [3].

Spěchovatelnost směsi je schopnost přetváření a dosažení určité objemové hmotnosti v uzavřeném prostoru při působení vnějšího zatížení. Závisí na velikosti působícího zatížení a odporu směsi proti přetváření. Vnitřní odpor proti přetváření je definován tekutostí pojiva a granulometrií ostřiva. Zkouška spēchovatelnosti se provádí pomocí hydraulického přístroje na vzorku nakypřené směsi.

Spěchovatelnost citlivě reaguje na změny ve vlhkosti směsi. Suší formovací směs má nižší spēchovatelnost a velkou sypnou objemovou hmotnost (slabší pojivové obálky). Taková směs je tekutější a lépe se s ní plní a zhušťují formy na formovacích strojích. Zápornou stránkou je vyšší riziko vzniku zadrobenin.

Vlhčí směs má naopak nízkou sypnou objemovou hmotnost a vysokou spēchovatelnost. Její schopnost zaplňovat dutiny je horší kvůli nízké tekutosti směsi. Energie se z formovacího stroje do směsi přenáší hůře, čímž dochází k výrobě měkkých forem [3].

Kromě obsahu vody závisí spēchovatelnost i na použitém bentonitu a obsahu jemných podílů ve směsi. Aby nedocházelo k výkyvům v kvalitě forem, měl by se interval spēchovatelnosti směsi pohybovat kolem $\pm 3 \%$ od ideální hodnoty (pro konkrétní případ). Například při zhutňování kombinací střešání s dolisováním bude pro optimální spēchovatelnost 45 % dovolen rozsah hodnot 42-48 % [6].

Na spēchovatelnost má vliv i obsah vyplavitelných látek. Jedná se o zbytky znehodnoceného bentonitu a nečistoty. Jejich povrch je v porovnání s objemem velký, čímž zvyšují spotřebu vody pro stejné navlhčení (spěchovatelnost). Negativně ovlivňují také prodyšnost, neboť tyto drobné částice vyplňují prostory mezi zrny ostřiva a zabraňují tak unikání plynů. Vyšší množství vyplavitelných látek má i malý pozitivní efekt – smísené s pojivem vytváří větší pojící obálku kolem zrn ostřiva, což může vést k vyšším hodnotám pevnosti.

Aktivní bentonit vypovídá o pojící schopnosti, a tedy celkově o vlastnostech formovací směsi. Jeho množství závisí na míře znehodnocování a doplňování při oživování novými surovinami. Zároveň lze změnu obsahu aktivního bentonitu sledovat měřením pH a elektrické vodivosti směsi. Pokles hodnoty pH značí přibývání degradovaného bentonitu, růst vodivosti naopak poukazuje na zvyšující se množství aktivního bentonitu ve formovací směsi [3].

Doporučené technologické hodnoty bentonitových směsí jsou na Obr. 12:

vlhkost	dle požadované spěchovatelnosti			
spěchovatelnost	impulzní pěchování 30 – 40 %	vstřelování + dolisování 30 – 40 %	střásání + dolisování 40 – 55 %	ruční formování 50 – 60 %
prodyšnost	ocelové odlitky 150 – 350 n.j.p.		litinové odlitky 100 – 200 n.j.p.	
vaznost	dle způsobu formování 90 – 230 kPa			
pevnost v tahu v kondenzační zóně	minimální hodnota 1,5 kPa, optimální hodnota 2,0 – 3,5 kPa			
vyplavitelné látky	ocelové odlitky 8 – 11 %		litinové odlitky 11 – 14 %	
ztráta žíháním	ocelové odlitky max. 2 %		litinové odlitky 4 – 6 %	
aktivní bentonit	dle způsobu formování 6 – 10 %			

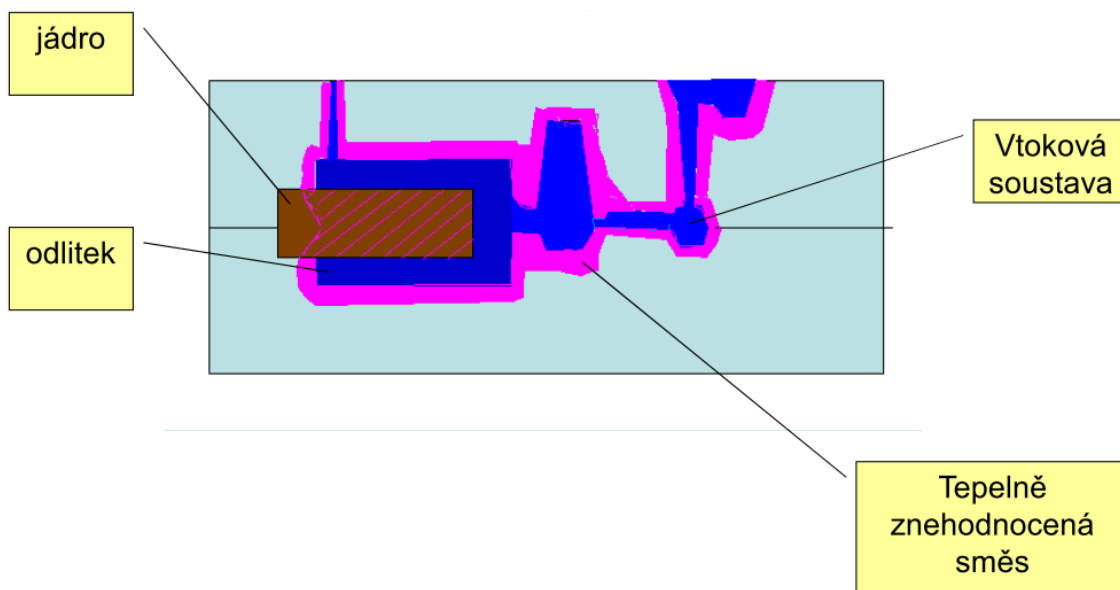
Obr. 12 Doporučené technologické hodnoty bentonitových směsí [3]

1.7 Znehodnocení bentonitové formovací směsi

Pracovní cyklus bentonitové směsi zahrnuje smísení vratné směsi s oživujícími přísadami, výrobu formy upěchováním, odlití, vytlučení a opětovné mísení atd. Při každém odlévání dochází k tepelnému zatížení formy. Ve vrstvě formy, která je nejbližší tavenině, dochází k silnému prohřátí (Obr. 13). Jílové pojivo zde ztrácí krystalovou vodu (voda pevně vázaná ve struktuře bentonitu), a tak i pojící schopnosti. Dále od kovu, kde je tepelné ovlivnění směsi nižší nebo žádné, nedochází ke znehodnocování pojiva. Krystalová voda v jílu zůstává. Směs je pouze vysušena a po opětovném zavlhčení získá zpět své pojící schopnosti [3].

Velká část znehodnoceného bentonitu ulpívá na povrchu odlitku, čímž se dostává pryč ze směsi. Její množství závisí na hmotnosti litého kovu a na tvaru odlitku. Velké a komplexně tvarované odlitky znamenají více degradovaného jílu. Jako příklad lze uvést rozdíl mezi zasaženou směsí u odlitku koule a desky stejné hmotnosti [6]:

1. koule (30,6 kg, průměr 200 mm)
 - teplota 500 °C zasahuje do hloubky 27,5 mm od povrchu. Zasažený objem činí 4,49 dm³, čemuž odpovídá 0,52 kg bentonitu při 8 % obsahu bentonitu ve formovací směsi.
2. deska (30,6 kg, rozměry 458x458x20 mm)
 - teplota 500 °C dosahuje do hloubky 21,2 mm, zasaženo je 11,43 dm³ směsi, tedy 1,33 kg bentonitu



Obr. 13 Vrstva znehodnocené směsi [6]

Tepelnou stálost bentonitu určuje teplota, při které jííl ztrácí krystalovou vodu. Tato teplota se liší dle druhu použitého bentonitu. Jedním z důvodů natrifikace je posunutí této teploty k vyšším hodnotám. U nenatrifikovaného Ca-bentonitu dochází ke ztrátě krystalové vody od 200 °C, kdežto u Na-bentonitu až nad teplotou 400 °C [3].

Kromě tepelné degradace se na celkových ztrátách bentonitu podílí chemické znečištění (solemi ze záměsové vody, degradovanými složkami aditiv) a ztráty při transportu formovací směsi [6].

Část bentonitu, která se podílí na pojivých schopnostech (tzv. aktivní bentonit), takto postupně ubývá. Jeho množství je proto nutné doplňovat novými surovinami při oživování formovací směsi. Kontrola obsahu aktivního bentonitu se provádí buď provozně – výpočtem z vaznosti, vlhkosti a spěchovatelnosti, anebo laboratorně, a to metodou metylenové modře. Doporučené množství aktivního bentonitu ve směsi se pohybuje v rozmezí 6-10 % [3].

K nechtěným změnám dochází také u ostřiva. Jak již bylo zmíněno, reakce vody bentonitové směsi s tekutým kovem může způsobit vznik FeO. Ten reaguje se zrný ostřiva za vzniku nežádoucího fayalitu. Nevhodné množství přísad v bentonitové směsi, přesněji nedostatek nosiče lesklého uhlíku, zase může mít za následek mechanickou penetraci tekutého kovu do formy [18]. Další problém je tvorba šamotizovaného jílu na povrchu zrn ostřiva. Tento jev se nazývá oolitizace a je obsahem kapitoly 1.8.

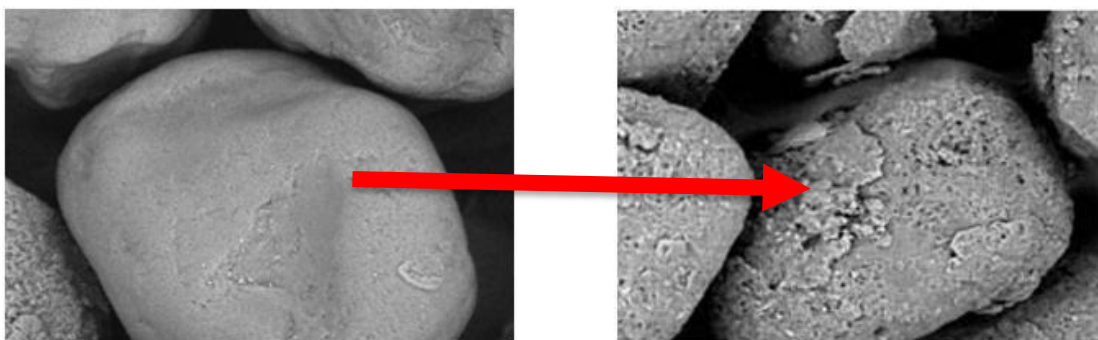
1.8 Oolitizace

Formovací směs, opakovaně procházející procesem, je značně tepelně zatěžována. Ta část, která se nachází v kontaktu s taveninou a poblíž (ohřátá nad 500 °C) začne na povrchu zrn ostřiva tvořit obálku ze šamotizovaného jílu (Obr. 14). Tento materiál již není schopen absorbovat vodu a plnit svou funkci. Pokud jsou tato zrna opětovně obalena pojivem a vystavena vysoké teplotě, vzniká další vrstva obálky. Tento proces neustálého narůstání obálky se nazývá oolitizace [3].

Následky oolitizace jsou především negativní:

- snižuje tepelnou vodivost formovací směsi, čímž dochází k vyššímu prohřívání formy a s tím souvisejícím rizikem vzniku zapečenin a připečenin,
- pórovitá struktura oolitizované vrstvy zvyšuje nasákavost zrn vodou, čímž se zvyšuje spotřeba vody, a tedy hodnota optimální vlhkosti. Více vody znamená vyšší stupeň oxidace především uhlíkatých látek.

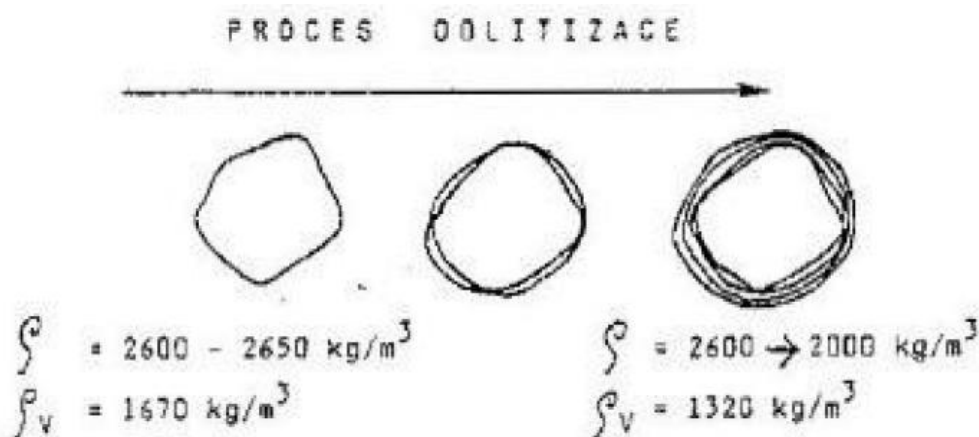
Na druhou stranu oolitizace snižuje mikrodilatace křemenných zrn. Tak se snižuje riziko vzniku vad, které souvisí s rostoucím napětím ve formovací směsi – menší riziko vzniku výronků, nárůstů a zálupů [19].



Obr. 14 Oolitizace - vznik šamotizované obálky [20]

Oolitizaci lze sledovat více metodami podle možností laboratoře a požadované přesnosti měření. Nejjednoduššími metodami je sledování sypné nebo měrné hmotnosti (Obr. 15). V laboratořích sléváren je k hodnocení používána navážka na zkušební těleso – váleček. Jelikož je oolitická vrstva porézní, má menší hustotu, a tím snižuje celkovou hmotnost zrn ostřiva. Přitom ale narůstající obálka zvětšuje objem těchto zrn. Výsledkem je nižší hmotnost při větším objemu směsi, což lze sledovat na klesající navážce na výrobu zkušebního válečku [3]. Tyto metody mohou být negativně ovlivněny přítomností cristobalitu, který má nízkou měrnou hmotnost v porovnání s β -křemenem, což způsobuje chybu při měření. Jinou metodou je sledování oolitizace pomocí ztráty žíháním při 900 °C. Značnou nepřesnost zde ale způsobuje ztráta ostatních složek směsi. Přesnější, avšak

pracnější metodou je rozpouštění šamotizovaných obálek v kyselině (fosforečné nebo fluorovodíkové), případně pozorování metalografického výbrusu na elektronovém mikroskopu. K těmto zkouškám je potřeba mít k dispozici vybavenou laboratoř [21]. Mezi novější metody patří stanovení oolitizace pomocí rentgenové difrakční analýzy [22].



Obr. 15 Změna sypné a objemové hmotnosti vlivem oolitizace [7]

1.9 Řízení vlastností bentonitových formovacích směsí

Cílem řízení je udržovat požadované vlastnosti v optimálních mezích, aby byla zaručena kvalita odlitků a nízké náklady. Požadovaná rozpětí pro vlastnosti směsi byla zmíněna na Obr. 12. Dále je vhodné dodržovat tato doporučení [6]:

- poměr obsahu znehodnoceného ku aktivnímu bentonitu – nejvýše 1:2,
- obsah uhlíkatých přísad ve směsích pro odlévání litin: 2-4 %,
- zrnitost ostřiva je dle požadavků na kvalitu povrchu v rozmezí 0,27-0,35 mm pro ocel a 0,20-0,26 mm pro litinu,
- množství dovolených vyplavitelných látek u litin v intervalu 3-10 %,
- stupeň oolitizace do 15 %.

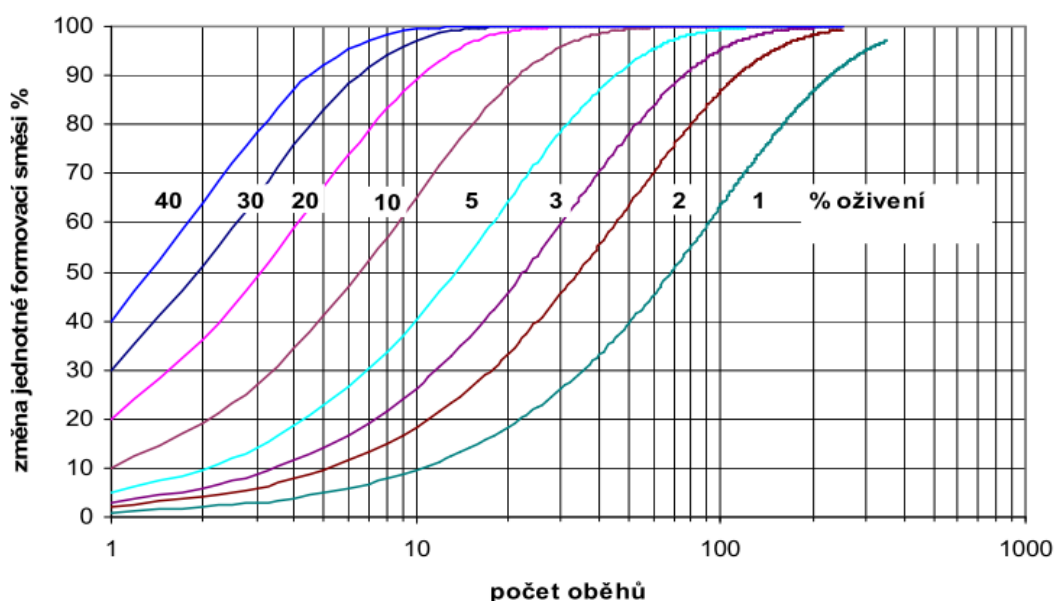
Kromě zajištění optimálních vlastností je cílem dodržovat tyto vlastnosti s minimálním rozptylem a zachovat nízký stupeň znečištění. To vše při nejmenší možné míře oživování – nejnižší spotřebě nových surovin. Problém představuje řízení potřebného množství vody, které se upravuje dodržováním optimální hodnoty spěchovatelnosti [3].

Jak již bylo opakovaně řečeno, s každým dalším oběhem se část složek směsi znehodnocuje – je tepelně degradován jíl, spotřebováván nosič lesklého uhlíku, mění se granulometrie zrn ostřiva. Zároveň dochází ke ztrátám směsi při transportu. Vše je nutné

kompenzovat dodáním nových surovin. K tomu dochází cíleně i samovolně – materiálem z rozpadlých jader.

Se změnou odlévaného sortimentu je nutné přehodnotit parametry oživování, neboť se mění podmínky ve formě a tím množství znehodnocené směsi. Při změně oživování se složení směsi ustálí nejdříve po 20-40 obězích směsi v závislosti na množství nových surovin. Větší stupeň oživování (poměr hmotnosti oživujících surovin ku hmotnosti dávky směsi do mísiče) se na změně formovací směsi projeví rychleji a též dojde k rychlejšímu ustálení nového složení, jak je vidět na Obr. 16.

Stejného efektu lze docílit při užívání většího množství jader. Jedná se především o ostrivo z jader, které, ve velkém množství, značně ovlivňuje celkový obsah ostríva ve formovací směsi. V extrémním případě může dojít až k tomu, že se rozpadlými jádry vykompenzuje nebo dokonce překročí dávka nového ostríva v oživení. V tom případě se z oživování ostrívo vyřadí. Při přemíře ostríva získaného z jader je nutno přidat více pojiva a přísad, než bylo plánováno [3].



Obr. 16 Rychlost ustálení směsi podle stupně oživení [12]

Nelze tedy skokově měnit typ ani množství žádné složky ve formovací směsi. Proto se jako ideální jeví mít směs připravenou na nejnáročnější odlitky (velkou míru znehodnocení). Na druhou stranu jde o zvýšenou finanční zátěž, která je často rozhodujícím faktorem. Volba tedy závisí na možnostech slévárny [3].

Přesné určení doporučeného dávkování nových složek do obíhající směsi bylo cílem mnoha prací, ze kterých byly praktikovány tyto metody [3]:

- podle výsledků z laboratoře
- preventivní řízení
- automatická kontrola
- stanovení stupně znehodnocení
- statistické řízení procesu

Metoda řízení oživování podle výsledků z laboratoře již není moc využívána z důvodu pomalé reakce na změnu vyráběného sortimentu. Laboratorní zkoušky jsou časově náročné, čímž se prodlužuje doba do získání správných parametrů oživování směsi. Metoda preventivního řízení využívá údajů bilance za předchozí období (za směnu, den, měsíc). Jinak řečeno – řídí se parametry oživování z předchozího období a řeší nedostatky. Jinou variantou, namísto bilancí, je řízení „dle modelu“. Podíl nových surovin je upravován podle kvality výsledného odlitku. V případě metody automatické kontroly jde o řízení celého procesu oživování pomocí počítače. Pravidelným odběrem směsi, na které se měří základní technologické parametry, jsou průběžně získávána aktuální data o procesu. Počítač na ně okamžitě reaguje změnou dávkování, čímž udržuje velmi malý rozptyl ve složení směsi. Metodou stanovení stupně znehodnocení lze též velmi kvalitně řídit oživování směsi. Využívá k tomu informace o aktuálním obsahu sledované složky ve směsi a množství stejné složky v oživení. Poslední metodou je využití nástrojů statistiky [3].

1.10 Použití bentonitových směsí

Výběr možných pojivových systémů je rozmanitý, přesto se ve velké míře stále využívají, a dále vyvíjí, směsi s jílovými pojivy. Přitom se jedná se o technologii používanou už téměř 100 let. Důvody jsou následující [23]:

- nízké náklady (směs, dřevěný/plastový model),
- všestranné použití (odlévání železných i neželezných kovů),
- použití forem v syrovém stavu – není potřeba dlouho čekat na vytvrzení sušením nebo chemickou reakcí,
- plastičnost směsi – dodatečné úpravy formy, snazší vyjímání modelu,
- prodyšnost formy – méně slévárenských vad způsobených plynými produkty odlévání,
- rychlé ochlazování odlitku ve formě (přítomnost vody),
- nízká spotřeba materiálu (opakovaná použitelnost směsi),

- není nutná nákladná regenerace směsi, pouze oživení novými surovinami,
- ekologické pojivo (problematickou složkou je pouze BTEX z nosiče lesklého uhlíku).

Na druhou stranu existují důvody proti použití bentonitové směsi [24]:

- nízká tuhost – deformace formy při lití a během tuhnutí – nižší přesnost rozměrů
- omezená nosnost (odlitky maximálně do 500 kg)
- záměsová voda – riziko vzniku slévárenských vad
- nevhodný k výrobě komplexních a tenkostěnných odlitků
- povrch odlitku vlivem hrubosti ostřiva
- pomalá změna složení formovací směsi v oběhu

2 PRŮBĚH EXPERIMENTU

2.1 Zadání práce

Praktická část této diplomové práce zahrnuje kompletní provedení zkoušek 4 bentonitových formovacích směsí, které byly opakovaně tepelně namáhané odléváním. Modelem byl kvádr o hmotnosti 19 kg. Oběhů směsi proběhlo celkem 21. Cílem bylo dosáhnout ustáleného stavu mezi oživováním a znehodnocováním.

Zadavatelem zkoušek a dodavatelem směsí je firma KERAMOST, a. s. Účelem je vývoj nových receptur směsných bentonitů. Závěrečná práce je navíc rozšířena o dodatečné zkoušky, které zahrnují posouzení stupně oolitizace, stupně ztráty bentonitové složky a metalografii rozhraní kov-forma.

Podnik Keramost se, kromě jiného, zabývá těžbou a zpracováním jílových hmot. Tyto materiály dodává do mnoha odvětví včetně slévárenství.

2.2 Úvod experimentu

Přesné cíle práce jsou následující:

1. porovnat dosažené průběhy hodnot technologických vlastností formovacích směsí,
2. porovnat množství ulpělé směsi na odlitcích,
3. stanovit stupeň znehodnocení bentonitu u jednotlivých směsí,
4. porovnat základní hodnoty finální vratné směsi z hlediska ekologie.

Celý experiment probíhal od června do srpna 2017 ve slévárně VUT, kde ho vykonávala čtveřice studentů.

Zadavatel dodal čtyři směsi bentonitů (dále SB) označené písmeny A až D. Jejich složení bylo takové, že obsah bentonitové složky byl 81 % pro bentonity A, B, C a 89 % pro směs D. Složení bentonitu a aditiv se lišilo. Jak a v jakém množství je tajemství výrobce. Ostřivem byl křemičitý písek dodaný firmou Sand Team, firemní označení SP 22 (hodnota D50 je 0,23 a pravidelnost zrnitosti ostřiva 66,2 %).

SB, tak i namíchané formovací směsi byly skladované v uzavíratelných nádobách, (Obr. 17) aby se nesmíchaly dohromady nebo nedošlo k jejich znečištění z okolí. Pro každý SB byla k manipulaci použita extra nádoba.



Obr. 17 Nádoby na skladování formovací směsi a SB.

V daném okamžiku probíhalo mísení a formování jen jedné směsi. S další směsí se začalo pracovat až po vyčištění pracovní plochy a uzavření nádoby s předchozí používanou směsí.

2.3 Příprava formovací směsi

Množství jednotlivých složek formovací směsi bylo stanoveno zadavatelem.

Při prvotním mísení se do mísiče navážilo 68 kg surovin při obsahu 7 % čistého bentonitu. Jejich množství pro jednotlivé druhy SB jsou uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Dávkování surovin pro 1. oběh

NOVÉ SUROVINY	A	B	C	D
písek [kg]	62,12	62,12	62,12	62,65
směsný bentonit [kg]	5,88	5,88	5,88	5,35

Při obězích č. 2 až 21 se směs oživovala SB a novým pískem, opět dle pokynu zadavatele. Po navážení 65 kg vratné směsi se oživovalo podle Tab. 2.

Tab. 2 Dávkování na oživení

OŽIVOVÁNÍ	A	B	C	D
písek [kg]	1,53	1,53	1,53	1,53
směsný bentonit [kg]	1,01	1,01	1,01	0,92

Navážené složky formovací směsi se nasypaly do kolového míšiče SIMPSON PM (Obr. 18) a přidala se voda tak, aby výsledná spěchovatelnost byla $45 \% \pm 2$. Ta se měřila na zařízení od firmy +GF+ (Obr. 19).



Obr. 18 Kolový míšič Simpson PM bez vrchního víka



Obr. 19 Zařízení na kypření směsi (vlevo) a měření spěchovatelnosti (vpravo)

Směs z nových surovin (1. oběh) se mísila 10 minut, oběhy 2 až 21 se mísily 4 minuty. Vzhledem k opotřebení mísiče a v zájmu mít co nejvíce homogenní směs se během mísení stroj dvakrát zastavil a ručně se seškrábala směs z běhounů, škrabek a z rohů v prostoru mísiče. Při obězích 2 až 21 se mísič zastavil po dvou a potom po jedné minutě. Čas, kdy se seškrábávala směs uvnitř mísiče, není započítán do celkové doby mísení. Po 4 minutách se směs v mísiči ještě jednou seškrábala a po 10 minutách s dodatečným mísením, v zájmu co nejlepší homogenizace směsi, se odebral vzorek na změření spěchovatelnosti. To zahrnovalo nakypření (homogenizace) směsi hrubým sítem a následným stlačením (Obr. 19).

Po namísení se na základě měření spěchovatelnosti směs zvlhčila nebo v případě vysoké hodnoty spěchovatelnosti se čekalo s otevřeným víkem mísiče, dokud směs přiměřeně nevyschne. V případě, že bylo třeba směs vysušit, tak se před odebráním vzorku na měření spěchovatelnosti ještě na 10 minut promísila, aby byla homogenní.

2.4 Formování

Spodní část formy se formovala na střešacím stroji s dolisováním Foromat 20 (Obr. 21). Modelová deska byla ošetřena separátorem Mazzon AIR VEST METAL K spray kvůli jejímu snazšímu vyjmutí z formy po zapěchování. Při obězích, ve kterých se prováděly zkoušky směsi, se měřila vaznost spodní části formy v dělicí rovině vaznoměrem +GF+ PFP (Obr. 20).



Obr. 20 Vaznoměr +GF+ PFP

Vrchní část formy, která tvořila horní stranu odlitku, obsahovala jen vtokovou jamku. Formována byla ručně. Taktéž byla ošetřena separátorem.



Obr. 21 Strásací stroj s dolisováním Foromat 20

Podlaha formovacího pracoviště byla po celý experiment pokryta igelitem, na který dopadala směs, jež rozhazoval stroj při své činnosti. Stejně tak se hlídala směs při ručním formování či vypouštění mísiče. Díky tomu nedošlo ke kontaminaci směsi prachem ze slévárny (nebo pouze minimálně) a ztráty směsi tak byly minimální.

2.5 Laboratorní zkoušky formovací směsi

Vlastnosti formovacích směsí byly stanovovány ze vzorků odebraných v zadaných obězích. Jednalo se o oživený vrat. V průběhu mísení všech směsí každého oběhu byla vymezena hodnota spěchovatelnosti ($45 \pm 2 \%$), dle které se upravilo množství vody ve směsi. Z odebraných vzorků jednotlivých směsí byly pro oběhy 1, 5, 10, 15, 19, 20, 21 a 22 dále měřeny tyto zadavatelem požadované parametry:

1. prodyšnost [j. p.]
2. vaznost (průměr ze 3 měření) [kPa]
3. pevnost ve štěpu (průměr ze 3 měření) [kPa]
4. pevnost v kondenzační zóně (průměr ze 3 měření) [kPa]
5. pH [-]
6. el. vodivost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
7. ztráta žiháním [%]
8. vyplavitelné látky [%]

9. síťová analýza ostríva po výplavu [-]
10. středová monofrakce [g]
11. středová monofrakce [ml]
12. středová monofrakce po žihání [%]
13. pevnost po vysušení 150, 300, 400 °C / 3 hod. – pouze u 22. oběhu [kPa]
14. adsorpce MM [mg MM/g vzorku]
15. množství aktivního bentonitu [%]
16. obsah lesklého uhlíku (LC) ze směsí [%]
17. obsah C (celkový) [%]
18. obsah S [%]

V případě vstupních surovin byly měřeny:

1. ostrívo
 - a. síťová analýza
 - b. sypná objemová hmotnost a ztráta žiháním – u středové monofrakce
 - c. vodivost vodního výluhu
 - d. pH
2. bentonity (všechny 4)
 - a. adsorpce MM
 - b. vlhkost
 - c. ztráta žiháním
 - d. vodivost
 - e. pH
3. voda (z vodovodu dostupném ve slévárně VUT FSI)
 - a. vodivost

Vzorky směsí se ke zkoušení dostaly maximálně do 1 hodiny od mísení, přičemž po celou dobu byly uzavřeny v nádobách, které bránily úniku vlhkosti. Zkoušky směsí prováděl autor dipl. práce společně s laborantkou ústavu slévárenství VUT FSI – paní Pavlicovou.

2.5.1 Vlhkost a prodyšnost

Hodnotu vlhkosti formovací směsi je nutné znát kvůli vlastnostem formy, které ovlivňuje – vaznosti, spěchovatelnost a jiné. Kromě toho dobře poukazuje na stav směsi, přesněji na její složení, a povrch zrn ošťívá.

Měření vlhkosti proběhlo na sušících vahách KERN DBS (Obr. 22 vlevo). Princip odpovídá běžné metodě, kdy se vzorek zváží s přesností na 2 desetinná místa, vysuší se a poté opět zváží. Po přepočtu dle rovnice (2.1) (váha jej provede automaticky) se zobrazí hodnota vlhkosti v procentech [25].

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_w} \cdot 100 \quad (2.1)$$

kde	w [%]	-	vlhkost,
	m_w [g]	-	hmotnost vlhkého bentonitu,
	m_s [g]	-	hmotnost vysušeného bentonitu.



Obr. 22 Sušící váhy KERN DBS (vlevo), měření prodyšnosti od +GF+ (vpravo)

2.5.2 Prodyšnost

K nastavení optimální vlhkosti je potřeba získat maximální prodyšnost směsi. Její ideální hodnota se liší dle bentonitu. Přístroj k měření je vyobrazen na Obr. 22 vpravo. Testovaný vzorek směsi má tvar válce o průměru 50 mm a výšce 50 mm. Je vyroben na zařízení – Obr. 23



Obr. 23 Zařízení pro výrobu válečků pro zkoušky

2.5.3 Pevnosti

Pevnost v tlaku za syrova (česky vaznost) nebo pevnost ve stříhu za syrova jsou schopnosti formy odolávat fyzické námaze a držet tvar formy.

Ke stanovení pevností byl užit hydraulický přístroj s měřicími manometry značky +GF+ (Obr. 24), na kterém byla měřena pevnost v tlaku a stříhu za syrova. Měření se lišilo použitím specifických čelistí pro daný způsob zatížení. Jako vzorky posloužily stejné válečky jako pro měření prodyšnosti. Každý vzorek (směs i oběh) byl měřen standardním postupem – 3x změřen a hodnoty zprůměrovány.



Obr. 24 Přístroj k měření pevností +GF+

Pevnost v tlaku po vysušení je potřeba znát z těchto důvodů:

1. ke zjištění síly potřebné k vyklepání odlitku a rozrušení hrud (vysoké hodnoty značí velké hroudy, které neprojdou vytloukacím roštem – velký odpad a nutnost vyšších dávek nových surovin),
2. některé výrobní linky potřebují dodržet vyšší pevnost v tlaku po odlití, jak minimální, jinak hrozí, že forma při transportu vypadne z rámu.

Měření proběhlo na válečcích žíhaných při teplotách 150, 300 a 400 °C [25].

Měření pevnosti v kondenzační zóně říká, jak je směs odolná proti vzniku zálupů. Přesněji jak odolává degradaci plastických vlastností při vyšších teplotách. Váleček směsi napěchovaný ve dvoudílné formě je shora ohříván v zařízení na měření pevnosti v kondenzační zóně (firma +GF+), což simuluje kontakt stěny formy s taveninou. Vlivem tepla zde dochází k odpaření vody a její kondenzaci dále od místa ohřevu. Rozdíly ve vlhkosti a problematická tepelná dilatace křemenného ostříva jsou během tepelné expozice testovány tahem. V momentě porušení přístroj přestane vyvíjet další sílu a na manometru zůstane hodnota pevnosti v kondenzační zóně [3].

2.5.4 pH a elektrická vodivost

Při lití dochází ve formě k rozkladu uhlíkatých látek. Produkty reakce jsou mimo jiné kyseliny, které působí na bentonit – deaktivují ho. Přitom dochází ke snížení pH, což indikuje zvýšené množství degradovaného bentonitu.

Opak, tedy přítomnost aktivního bentonitu, lze zjistit pomocí měření elektrické vodivosti. Více bentonitu má za následek vyšší vodivost směsi. Je nutno měřit za pokojové teploty, neboť její výkyvy ovlivňují výsledky [25].

Vzorek zalitý destilovanou vodou se 30 minut mísí v ultrazvuku (Obr. 25 vlevo). Poté se měří pomocí ponorné sondy. Zařízení firmy inoLab na Obr. 25 slouží k měření obou veličin, stačí pouze vyměnit sondu.



Obr. 25 Měření pH a el. vodivosti - ultrazvuk (vlevo) a měřící přístroj inoLab (vpravo)

2.5.5 Ztráta žháním

Hodnotí se obsah spalitelných látek, který dává údaj o množství uhlikatých přísad ve formovací směsi. Tohoto se využívá k úpravám jejich dávkování.

Suché vzorky směsi o váze 10,00 g s přesností na 2 desetinná místa se žhají v žhací peci (Obr. 26). Zde se při teplotě 900 °C ponechávají 3 hodiny. Po vychladnutí se opět zváží. Rozdíl hmotnosti před a po vážení udává hmotnost spalitelných látek ve formovací směsi. Kvůli nehomogenitě směsí je nutno provést alespoň 3 měření [25].



Obr. 26 Sušička Mora 524 (vlevo), žhací pec (vpravo)

2.5.6 Množství vyplavitelných látek

Těmi se u bentonitových směsí rozumí hlavně zbytky degradovaného bentonitu a nečistot. Povrch těchto drobných částic je velký, což způsobuje vyšší spotřebu vody pro stejné navlhčení (spěchovatelnost). Jedná se o volnou vodu, která se ale vypařuje rychleji, jak voda z bentonitu. Následkem je zvýšený výskyt vad související s touto vodou.

Stanovení bylo provedeno formou plavení a sedimentace vzorku směsi. Bylo naváženo přesné množství vysušeného písku, přidána voda a NaOH. Obsah se vařil a poté míchal. Takto byly ze zrn ostřiva uvolněny a rozvířeny jemné podíly směsi. Následně byla kádinka opakovaně doplněna vodou a poté stažena pomocí násosky. Tímto byly odstraněny neusazené drobné podíly směsi. Proces byl opakován, dokud sloupec vody nebyl po odstátí kompletně čistý. Po slití vody byl vzorek usušen v sušárně Mora 524 (Obr. 26). Po zchladnutí byl zvážen s přesností na 2 desetinná místa. Obsah vyplavitelných látek je dán rozdílem hmotnosti vzorku před a po výplavu [25].

2.5.7 Středová monofrakce

Je jiný název pro hmotnost nejtěžší frakce na sítové analýze. Stanovuje se kvůli výpočtu oolitizace povrchu zrn ostřiva.

Vzorek po plavení byl vysypán na horní síto zkušební sady sít (Obr. 27), kde se prosíval po dobu 10 minut pomocí vibrací. Zvážením jednotlivých frakcí na sítích byla nalezena ta nejtěžší – na síte o jemnosti 0,200 mm. Hmotnost byla převedena na objem přesypáním do malého odměrného válce. Důvod viz kapitola 2.5.8.



Obr. 27 Vibrační zařízení k síťovému rozboru

2.5.8 Stupeň oolitizace

Opakované tepelné zatížení jílu obalujícího zrno ostřiva vytváří stále větší šamotizovanou obálku, která pevně drží na zrnu a zhoršuje tak některé vlastnosti formovací směsi (zvyšuje optimální vlhkost, snižuje tepelnou vodivost...). Zjištění míry oolitizace ukazuje na správnost nastavení oživování směsi [3].

Ke kontrole oolitizace je k dispozici několik metod [3]:

1. mikroskopem na výbrusech (elektronový mikroskop)
2. rozpouštění oolitiz. obálek v kyselinách (složitě)
3. ztráty žíháním při 900 °C (nepřesné kvůli ztrátě i jiných složek)
4. rentgenová difrakční analýza (rentgen) [26]
5. sledování navážky zkušebních tělísek
6. pyknometricky (změna měrné hmotnosti) [22]
7. rozdíl sypné objemové hmotnosti

Použití poslední metody bylo zvoleno z důvodu dostačující informace o míře oolitizace při nízkém počtu oběhů, kterými směsi prošly. Během pokusu bylo totiž dosaženo asi jen 30 % z možných oolitických obálek při dlouhodobém používání. Pro rovnovážný stav pro oolitizaci by bylo nutno vykonat asi 70 oběhů při oživení 3,7 % (poměr hmotnosti nových surovin ku hmotnosti dávky do mísiče) viz literatura [12].

Metoda využívá změny v objemu zrn, neboť šamotizovaná obálka má menší hustotu (je porézní), než zrna SiO_2 . Při stejné hmotnosti vzorku zaujímá pak každá směs jiný objem podle míry oolitizace. Autoři tohoto způsobu měření jsou prof. Jelínek a ing. Mikšovský z VŠB – TU Ostrava.

Porovnání proběhlo na neoživené vratné směsi z 21. oběhu. Srovnávala se hodnota sypné objemové hmotnosti (zkráceně SOH) směsi vůči ostřivu. SOH se zjišťuje na nejvíce zastoupené frakci směsi (o velikosti zrn 0200-0,315 mm), aby se eliminoval vliv zrnitosti.

2.5.9 Bentonit vypočtený

Vypočtený obsah bentonitu slouží k rychlé průběžné kontrole technologických vlastností směsi. Dle něj lze automaticky upravovat dávkování nových surovin do mísiče.

K výpočtu byla vybrána metoda od autorů Heine, Schumacher, Green, neboť oproti ostatním rovnicím, které počítají se 2 parametry směsi, zohledňuje tato metoda 3 veličiny. Vstupy pro výpočet jsou spěchovatelnost, vaznost a vlhkost – rovnice (2.2) [12]:

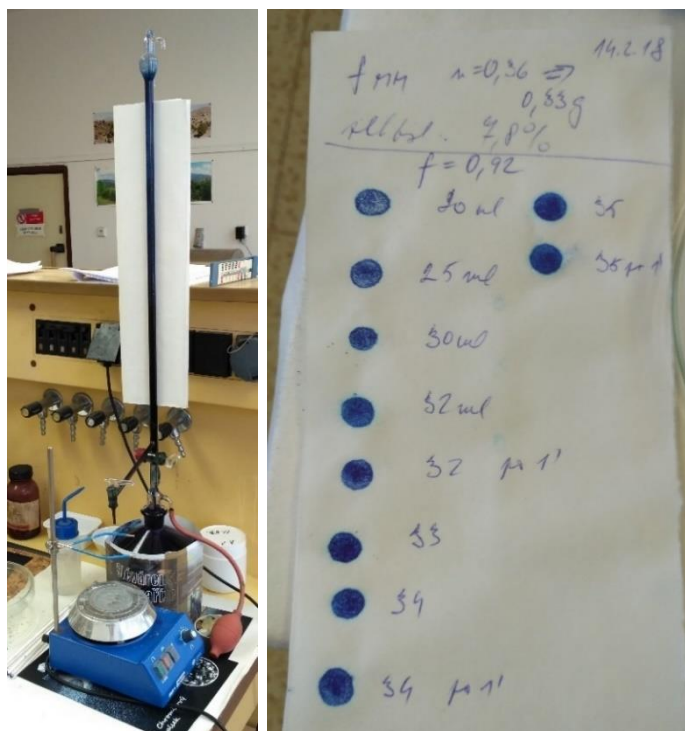
$$b_v = \frac{0,435 \cdot \sigma_d \cdot w \cdot \log(Sp) + 362}{109} \quad (2.2)$$

kde	b_v [%]	-	bentonit vypočtený,
	σ_d [kPa]	-	vaznost,
	Sp [%]	-	spěchovatelnost,
	w [%]	-	vlhkost.

2.5.10 Adsorpce metylenové modři

K určení podílu aktivního bentonitu ve směsi se využívá adsorpce metylenové modře bentonitem (dále MM). Jelikož má každý bentonit odlišné složení, jsou i sorpční vlastnosti rozdílné.

Do suspenze bentonitové směsi se prvně přidá 85-90 % roztoku MM na předpokládanou adsorpci. Poté se dále přidává po 1 ml. Po každém přidání se přenáší kapka vzorku na filtrační papír. Po nasycení zůstává v roztoku přebytek modři, který po přenesení na filtrační papír vytvoří na okraji kapky modrozelené echo (Obr. 28) [25].



Obr. 28 Měření MM - aparát s roztokem modře (vlevo), příklad filtračního papíru s kapkami (vpravo)

Získaná hodnota v mililitrech roztoku MM se přepočítá na adsorpci jílu (2.3) [25]:

$$H = \frac{A \cdot F}{B - \frac{B \cdot C}{100}} \cdot 3,74 \quad (2.3)$$

kde	H [mg/g]	-	hodnota adsorpce mg MM/g vzorku směsi,
	A [ml]	-	spotřeba roztoku MM,
	F [-]	-	korekční faktor,
	B [g]	-	navážka bentonitu,
	C [%]	-	vlhkost,
	3,74 [g/l]	-	g MM/l destilované vody.

Korekční faktor F je dán podílem dané hodnoty adsorpce na standardu bentonitu ku hodnotě, která je naměřena na stejném bentonitovém standardu, ale v době před měřením adsorpce MM bentonitovou směsí. Roztok MM totiž vlivem času, světla a teploty mění své vlastnosti.

2.5.11 Množství aktivního bentonitu

Podstatou bentonitu ve formovací směsi je jeho pojivová schopnost. Při lití do bentonitových forem dochází ke zmenšování jeho podílu ve směsi (tepelné degradaci). Podíl sorpce MM směsi oproti čistému bentonitu – rovnice (2.4) vypovídá o tomto úbytku, případně přebytku vinou nevhodně nastavených charakteristik oživování [17].

$$ab = \frac{MM_{směsi}}{MM_{bentonitu}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

kde	ab [%]	-	aktivní bentonit,
	MM _{směsi} [mg]	-	adsorpce MM vzorku směsi,
	MM _{bentonitu} [mg]	-	adsorpce MM směsného bentonitu.

2.5.12 Obsah uhlíku a síry

Obsah uhlíku ve směsi se využívá jako přibližná informace o množství lesklého uhlíku, který má vliv především na kvalitu povrchu odlitku. Síru je zase potřeba hlídat z důvodu jejích nechtěných účinků na strukturu, především degradaci tvaru grafitu u litiny nebo tvorbě vměstků v ocelích. Ty jsou pak příčinou horších mechanických vlastností nebo vzniku trhlin [27].

Množství uhlíku a síry se přesně určuje ve spalovacím analyzátoru, který vyhodnocuje obsah obou těchto prvků současně. Použit byl přístroj firmy Bruker, model G4 ICARUS (Obr. 29). V principu jde o spalování vzorku společně s akcelerátorem hoření (v tomto případě byl užit wolfram). Přitom dochází k vývinu plynů, které jsou při cestě přístrojem upraveny a čištěny od nechtěných složek. Požadované látky detekují infračervenými senzory. Ze zjištěných koncentrací plynů jsou vypočteny obsahy uhlíku a síry [28].



Obr. 29 Spalovací analyzátor Bruker G4 ICARUS

2.5.13 Obsah lesklého uhlíku

Funkcí lesklého uhlíku, jinak „pyrolýzního“ či zkráceně LC, je různými způsoby zlepšit povrch odlitku a zabránit penetraci kovu do formy. K tomu je potřeba, aby ho v namísené směsi zbylo měřitelné množství [22].

Stanovení obsahu LC ve směsích provedla firma KERAMOST, a.s. Použita byla běžná metoda pro tuto problematiku – podle paní Inge Bindernagel. Jde o ohřev suchého vzorku v muflové žíhací peci za teploty 900 °C. Společně se vzorkem je v peci přítomna křemenná vata, která byla předem zvážena [13].

Prchavé látky, které se při žíhání (ohřevu) uvolňují ze směsného bentonitu, obsahují kromě jiného hledaný pyrolýzní uhlík. Ten kondenzuje na připravené vatě. Rozdíl hmotnosti vaty před a po žíhání udává informaci o obsahu LC.

Problém této zkoušky je ten, že uhlík před vatou upřednostňuje kyslík. Než se tedy začne vylučovat na vatě, dochází přednostně k reakcím s O₂ za vzniku CO₂. Kyslík je přítomen v atmosféře pece jako plyn a součást vodní páry. Navíc je obsažen i ve vodě v bentonitu. Kvůli tomu nelze měřit jeho přesné množství [13].

Lepší hodnotu množství LC zjistíme upřesněním pomocí výsledků ze zkoušky sorpce metylenové modře a koeficientu, který se dá upřesnit pro každý druh bentonitu – rovnice (2.5) [12]:

$$LC \text{ s korekcí} = LC \text{ bez korekce} + k * MM \quad (2.5)$$

kde	LC [%]	-	množství lesklého uhlíku,
	MM [mg MM/g]	-	sorpce metylenové modře,
	k [-]	-	zjištěný koeficient pro daný bentonit.

2.6 Zkušební odlitek

Zkušebním odlitkem byl kvádr s rozměry 170×170×90 mm, jeho hmotnost byla cca 20 kg. Na Obr. 30 je znázorněné modelové zařízení.



Obr. 30 Modelové zařízení, spodní část vlevo, vrchní vpravo

2.7 Příprava tekutého kovu a lití

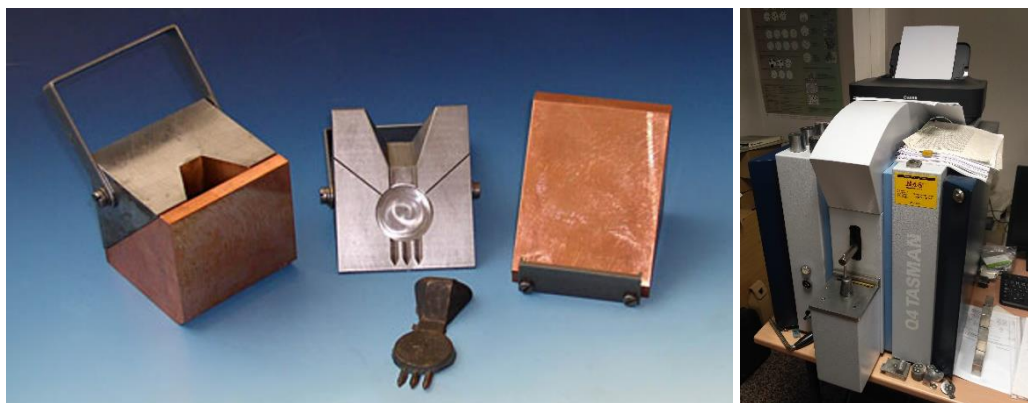


Obr. 31 Indukční pec CONSARC [29]

Tavení probíhalo ve středofrekvenční indukční kelímkové peci s neutrální výduskou (Obr. 31). Litým kovem byla litina s lupínkovým grafitem (GJL-200). Jako vsázka byl při neměřených obězích použit 100 % litinový vrat. V hlídaných obězích byla vsázka sestavená korektně – surové železo, ocel, litinový vrat a přísady. Při tavení a ohřívání kovu na odpichovou teplotu se průběžně z povrchu taveniny stahovala struska, zahuštěná prostředkem Koax. Při tavních, kde se vyžadoval rozbor chemického složení (oběh 19-21), se odebral vzorek taveniny (Obr. 32) a pomocí spektrální analýzy (přístroj Q4 TASMAN – Obr. 32) se zjistilo aktuální chemické složení. Podle toho se řídilo další tavení, čímž se také udržovalo stejné složení (Tab. 3) při těchto posledních třech tavních.

Tab. 3 Chemické složení kovu

prvek	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si
[%]	3,22	0,07	0,12	0,86	0,05	0,061	0,04	1,8



Obr. 32 Kokila pro odběr vzorků (vlevo) [30], spektrometr Q4 TASMAN (vpravo)

Při dosažení odpichové teploty (cca 1400 °C) se tavenina z pece přelila do předeřáté pánve. Přitom se provádělo očkování do pánve (0,3 %). Použité očkovadlo bylo na bázi FeSi. Jednalo se o produkt Foundrisil (s aktivními prvky Ca a Al) od výrobce Elkem. Následně se stáhla struska z povrchu taveniny, opět zahuštěna prostředkem Koax, a měřila se teplota taveniny (ponornou metodou pomocí termočlánekových kartuší Termosondy Kladno s tolerancí ± 5 °C). Po dosažení požadované teploty se její hodnota poznamenala jako teplota lití. Cílová teplota lití byla 1355 °C. Množství kovu nalitého do pánve stačilo na zaplnění dvou forem, takže se odlévalo nadvakrát. Při každém odpichu kovu byla změřena a zaznamenána teplota a doba lití (Tab. 4).

Každý oběhový cyklus se střídalo pořadí, ve kterém se formy odlévaly: A, B, C, D nebo B, A, D, C, aby se zajistila rovnoměrná tepelná zátěž formovacích směsí. Doby lití jsou v Tab. 4.

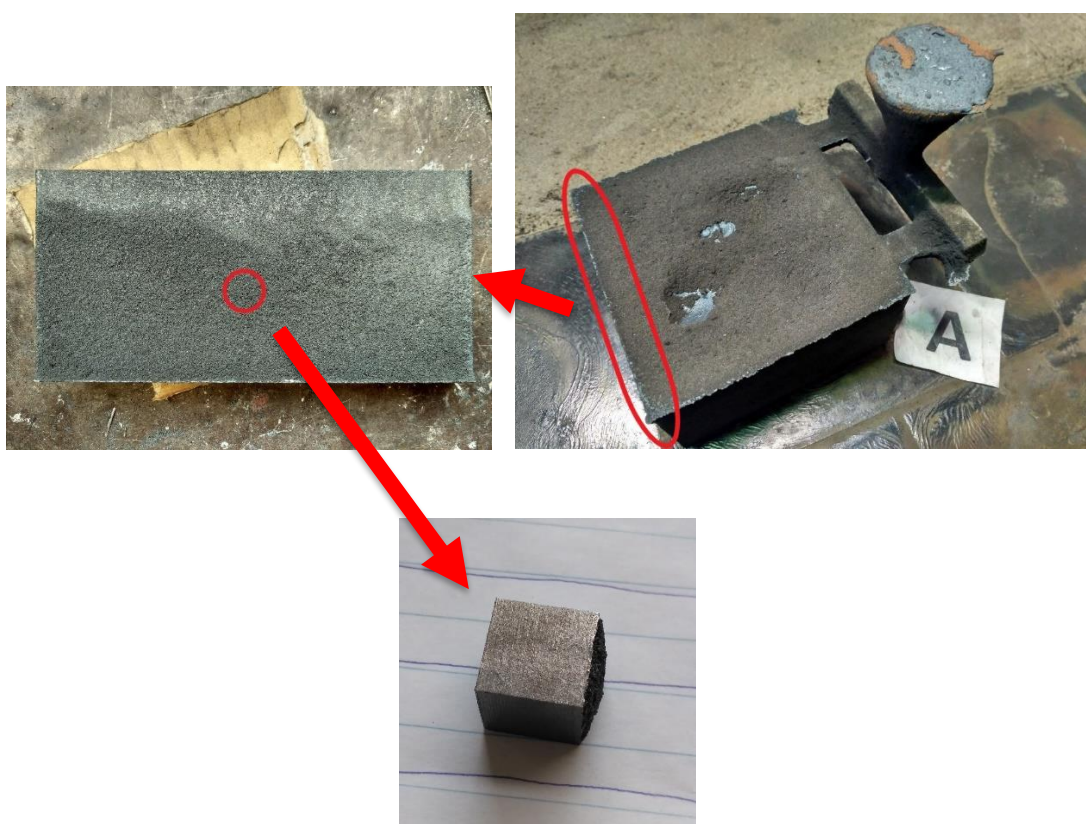
Tab. 4 Teploty a doby lití

oběh	teplota lití [°C]		doba lití [s]			
	A, B	C, D	A	B	C	D
1	1350	1350	-	-	-	-
2	1350	1344	19	-	17	-
3	1350	1352	16	16	19	16
4	1354	1353	14	14	18	14
5	1363	1359	18	17	17	16
6	1359	1354	17	14	15	17
7	1343	1352	17	17	14	16
8	1362	1360	17	17	13	17
9	1351	1353	14	15	15	17
10	1363	1355	23	15	13	14
11	1358	1351	17	15	15	14
12	1361	1352	16	14	14	14
13	1355	1357	15	20	22	18
14	1362	1355	18	20	16	21
15	1357	1359	14	14	15	18
16	1356	1355	18	14	16	15
17	1355	1359	17	17	16	15
18	1350	1350	19	12	14	16
19	1355	1353	14	14	13	15
20	1355	1357	16	13	13	11
21	1355	1353	13	14	15	14

Odlité formy se nechaly vychladnout pod teplotu 250 °C, kdy už bentonit a uhlíkatá přísada nebyly dále tepelně znehodnocované a odlitky se vytloukly z forem. Druhý den už byla formovací směs dostatečně vychladlá a připravená na další mísení.

2.8 Řezání odlitku a tryskání

Hodnocení ulpělé směsi bylo provedeno na základě rozdílu hmotnosti výřezu spodní části odlitku před a po otryskání. Po odlití byly na odlitcích z oběhů 3, 5, 10, 13, 15, 18, 19, 20 a 21 odstraněny vtokové soustavy a odlitky očištěny kartáčem. Následně byly uříznuty spodní části odlitků o tloušťce cca 5 mm viz Obr. 35. U odlitků litých v 10. oběhu do směsí A a B se zapomnělo očkovat, kvůli čemuž došlo k metastabilnímu tuhnutí a vzniku zákalky v místě řezu, což znemožnilo řezání. U oběhů 15 a 20 byla řezána ještě přední stěna o tloušťce kolem 10 mm, ze které byl dále vyříznut vzorek pro metalografii (Obr. 33). Místo vyříznutí metalograf. vzorku bylo vybráno s ohledem na homogenitu kovu.



Obr. 33 Surový odlitek (nahore), přední stěna (uprostřed) a vzorek pro metalografii (dole)

Veškeré řezání bylo provedeno na pásové pile BOMAR Ergonomic 320.250 DG – Obr. 34. Řezy byly provedeny bez řezné kapaliny, aby ulpělá směs na odlitku nenasákla řeznou kapalinou. Vzorčky pro metalografii byly broušeny po stranách na odstranění otřepů z řezání. Všechny povrchy byly fotografovány (Obr. 35).



Obr. 34 Pásová pila Bomar Ergonomic 320.250 DG

Desky ze spodní části odlitku byly zváženy na laboratorní váze s přesností vážení 0,01 g. Následně byly rovnoměrně otryskány na stolovém kruhovém tryskači (ve firmě ALFE BRNO, s.r.o.) po dobu 2 minut (7 otáček stolu, kdy na otáčku došlo k přibližně 15 vteřinám tryskání). Po této době se desky jevíly dostatečně otryskány. Pak byly opět zváženy a vyfoceny (Obr. 35). Z rozdílu hmotností před a po tryskání se určilo množství ulpělé formovací směsi.



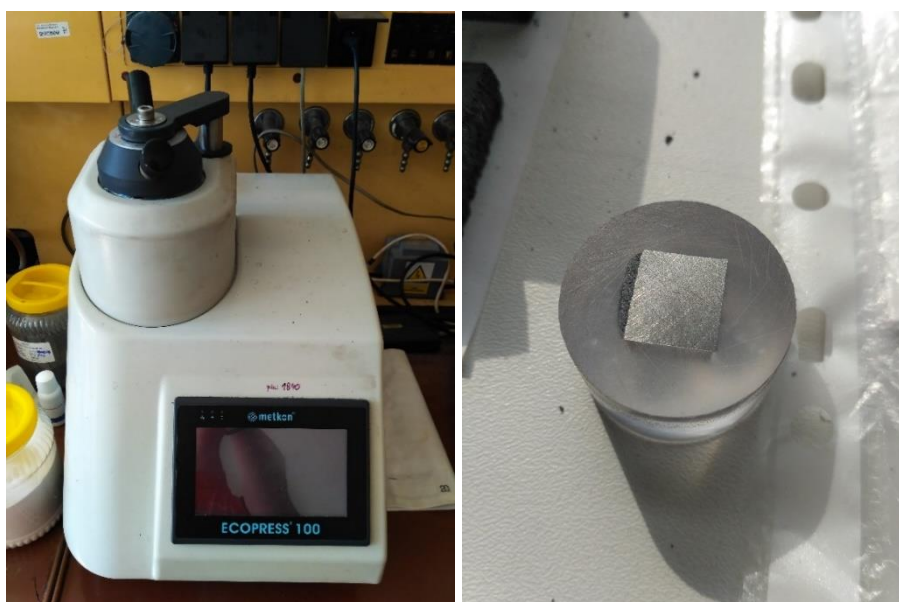
Obr. 35 Spodní část odlitku před (nahore) a po tryskání (dole)

2.9 Metalografie

Formovací směs ovlivňuje různými způsoby povrch odlitku. Jeho drsnost závisí mimo jiné na hrubosti ostřiva a schopnosti směsi zamezit penetraci kovu. Po chemické stránce hrozí nebezpečí reakce kovu s ostřivem nebo pojivem. Na případný problém upozorní existence oduhličené vrstvy kovu u rozhraní kovu a formovací směsi [18].

Cílem metalografie je, v tomto případě, posoudit, zda kov nepenetroval do směsi a případně jakým způsobem – mechanicky nebo chemicky.

Příprava vyříznutého vzorku (Obr. 33) k metalografickému hodnocení začala zbrúšením otřepů, oplachem lihem, osušením a následným zalisováním vzorku (přístroj Metcon ECOPRESS 100 – Obr. 36). Zkoumaná byla vrchní strana vzorku.



Obr. 36 Metcon ECOPRESS 100 (vlevo) a jeho produkt (vpravo)

Zalisovaný vzorek (Obr. 36) se opět obrousil a opláchnul lihem. Poté pokračoval na broušení a leštění na přístroji Struers LaboPol-5 (Obr. 37), kde bylo možno zpracovávat až 3 vzorky zaráz. Hrubost použitých kotoučů (Obr. 37) se snižovala až na hodnotu 3 μm (za použití leštící pasty). Posledním krokem přípravy vzorku bylo leptání za užití leptadla Nital (3 % roztok kyseliny dusičné). Po oplachu lihem byl vzorek připraven na mikroskopii [31].



Obr. 37 Struers LaboPol-5 (vlevo) a brusné kotouče (vpravo)

Pozorování probíhalo na světelném mikroskopu MTM 406 při zvětšeních 40x, 100x a 200x. Snímky byly zachyceny digitálním fotoaparátem Olympus E-510. Aparatura viz Obr. 38.



Obr. 38 Světelný mikroskop MTM 406 s digitálním fotoaparátem Olympus E-510

2.10 Stupeň znehodnocení směsi

Obsah znehodnocených složek směsi patří mezi požadavky pro nalezení jejich rovnovážných obsahů. S touto znalostí lze správně řídit dávkování jednotlivých komponent pro oživování formovací směsi.

Cílem experimentu bylo najít celkový stupeň ztráty bentonitu pro 4 testované receptury. Celkovými ztrátami je standardně myšlena znehodnocená a nedotčená směs.

V případě experimentu, kdy byla veškerá směs pečlivě mísená i formována s následným úklidem pracoviště pro zpracování další směsi, jsou ztráty nedotčené směsi považovány za minimální a zanedbávají se. Tedy za celkové ztráty je považováno pouze znehodnocení směsi při odlití [12].

K vyhodnocení ztrát je třeba znát stupeň oživení formovací směsi (rovnice (2.6)) [6]. Jde o poměr hmotnosti nových surovin přidanych do formovací směsi během jednoho mísení (oběhu) ku hmotnosti dávky do mísiče.

$$n = \frac{G_n}{G_0} \quad (2.6)$$

kde	$n [-]$	-	stupeň oživení,
	$G_n [\text{kg}]$	-	hmotnost nových surovin,
	$G_0 [\text{kg}]$	-	hmotnost namísených surovin.

Dále je potřeba vědět, kolik bentonitu do směsi přináší oživení. K tomu posloužila zadaná hmotnost nového směsného bentonitu na dávku mísiče a podíl čistého bentonitu v něm.

Ze zmíněných parametrů oživování a množství aktivního bentonitu v namísené směsi lze vypočíst stupeň ztráty bentonitu (2.7) [12]:

$$z_c = \frac{n \cdot (a_n \cdot a)}{a \cdot (1 - n)} \cdot 100 \quad (2.7)$$

kde	$z_c [\%]$	-	stupeň celkové ztráty složky,
	$a_n [-]$	-	podíl složky v oživení,
	$a [-]$	-	podíl složky ve formovací směsi.

2.11 Ekologie

K získání kvalitního povrchu odlitku je důležitý lesklý uhlík. Ten se získává z uhlíkatých přísad. Jejich přínos ale není vždy pozitivní – záleží na použitém nosiči. Hlavní problém je obsah nebezpečných látek. Řeší se především parametr BTEX (koncentrace benzenu, toluenu, ethylbenzenu a xylenu) v uvolněných plynech při lití a vytloukání. Kromě těkavých látek je hrozbou ještě uvolňování organického uhlíku z odpadů [16].

Testování provedla firma EMPLA AG spol. s r. o. v Hradci Králové. Zkoušeny byly vzorky všech 4 směsí z konce experimentu.

3 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Během zkoušek byly odebírány vzorky formovací směsi, u kterých byly následně hodnoceny vlastnosti směsi dle požadavků zadavatele. Dále bylo měřeno množství ulpělé formovací směsi na odřezku spodní části odlitku na základě rozdílu hmotnosti před a po otryskání. Na závěr byla navíc zhodnocena metalografie se zaměřením na rozhraní kov – formovací směs, oolitizace ostříva, stupeň znehodnocení bentonitu a ekologie.

Vlastnosti formovacích směsí byly stanovovány ze vzorků odebraných v 1., 5., 10., 15., 19., 20., 21. a 22. oběhu. V průběhu mísení směsí byla vymezena hodnota spěchovatelnosti ($45 \pm 2 \%$), dle které se upravilo množství vody ve směsi. Dále byly měřeny vlastnosti směsí zmíněné dříve (prodyšnost, vaznost...).

Výsledky většiny laboratorních zkoušek všech namísených směsí jsou uvedeny níže v Tab. 5 až Tab. 8. Všechny naměřené hodnoty jsou zhodnoceny v podobě grafů, fotografií a dalších tabulek dále.

Tab. 5 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem A

BENTONIT A	1	5	10	15	19	20	21	22
vlhkost [%]	2,54	2,70	3,12	3,26	3,77	3,71	3,82	4,15
spěchovatelnost [%]	45	47	47	47	47	46	47	46
navážka [g]	152,0	152,0	150,0	151,0	148,0	148,0	146,0	143,0
prodyšnost [j. p.]	110	70	70	60	70	70	70	80
vaznost [kPa]	170	195	205	203	198	193	196	207
pevnost ve štěpu [kPa]	25	30	37	32	31	25	32	34
pevnost v kondenzační zóně [kPa]	3,6	3,0	3,2	3,6	3,2	2,9	3,0	3,0
pH [-]	10,05	9,70	9,90	9,80	9,45	9,62	9,70	9,84
vodivost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	281	323	344	367	422	451	458	462
ztráta žiháním [%]	2,9	3,7	4,2	4,4	4,5	4,5	4,5	4,7
vyplavitelné látky [%]	7,46	10,76	17,76	17,78	16,64	16,56	17,52	17,70
středová monofrakce [g]	27,80	27,42	26,89	23,75	26,95	24,95	24,75	23,55
středová monofrakce [ml]	18,0	17,9	16,5	15,0	17,0	15,5	15,5	14,5
ztráta středové monofrakce žiháním [%]	0,2	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	1,3	1,2
bentonit vypočtený (Heine, Schumacher, Green) [%]	6,2	6,8	7,6	7,7	8,3	8,1	8,3	9,0

Tab. 6 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem B

BENTONIT B	1	5	10	15	19	20	21	22
vlhkost [%]	2,62	2,80	3,44	3,29	4,22	4,16	4,05	4,48
spěchovatelnost [%]	46	46	47	45	46	47	45	46
navážka [g]	154,0	151,0	149,0	148,0	146,0	148,0	146,0	142,0
prodyšnost [j. p.]	90	70	70	80	80	60	70	80
vaznost [kPa]	189	195	205	206	200	203	204	207
pevnost ve štěpu [kPa]	27	30	39	37	31	32	33	34
pevnost v kondenzační zóně [kPa]	3,2	3,0	3,4	3,3	3,5	2,9	3,0	3,0
pH [-]	10,05	9,70	9,70	9,63	9,30	9,64	9,70	9,58
vodivost [μS/cm]	293	323	354	378	426	420	428	435
ztráta žiháním [%]	2,3	3,7	4,1	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4
vyplavitelné látky [%]	8,36	10,98	16,44	16,08	17,92	16,32	16,92	16,58
středová monofrakce [g]	26,19	25,54	25,74	24,04	24,36	23,75	24,07	21,74
středová monofrakce [ml]	16,5	16,0	16,0	15,0	15,5	15,0	15,0	14,5
ztráta středové monofrakce žiháním [%]	0,2	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1
bentonit vypočtený (Heine, Schumacher, Green) [%]	6,6	6,9	8,0	7,8	8,9	9,0	8,8	9,5

Tab. 7 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem C

BENTONIT C	1	5	10	15	19	20	21	22
vlhkost [%]	2,44	2,70	3,55	3,61	4,24	4,26	4,40	5,22
spěchovatelnost [%]	44	47	46	45	47	46	47	47
navážka [g]	153,5	154,0	149,0	148,0	146,0	148,0	146,0	142,0
prodyšnost [j. p.]	85	80	70	65	70	70	70	75
vaznost [kPa]	209	235	210	208	193	196	200	208
pevnost ve štěpu [kPa]	30	42	35	34	19	20	29	36
pevnost v kondenzační zóně [kPa]	3,2	4,3	3,6	3,5	3,2	2,9	3,0	3,0
pH [-]	10,03	9,70	9,59	9,60	9,61	9,62	9,70	9,69
vodivost [μS/cm]	337	373	402	414	428	422	431	438
ztráta žiháním [%]	2,1	3,4	3,8	4,0	4,3	4,8	4,8	4,8
vyplavitelné látky [%]	8,30	12,84	17,10	17,06	18,44	17,94	18,44	17,74
středová monofrakce [g]	25,00	24,68	24,72	23,14	24,72	23,13	23,84	22,18
středová monofrakce [ml]	16,0	15,0	15,0	14,0	15,0	14,5	15,0	15,0
ztráta středové monofrakce žiháním [%]	0,3	0,7	0,7	0,7	0,9	0,8	1,0	1,0
bentonit vypočtený (Heine, Schumacher, Green) [%]	6,7	7,6	8,3	8,3	8,8	8,9	9,2	10,6

Tab. 8 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem D

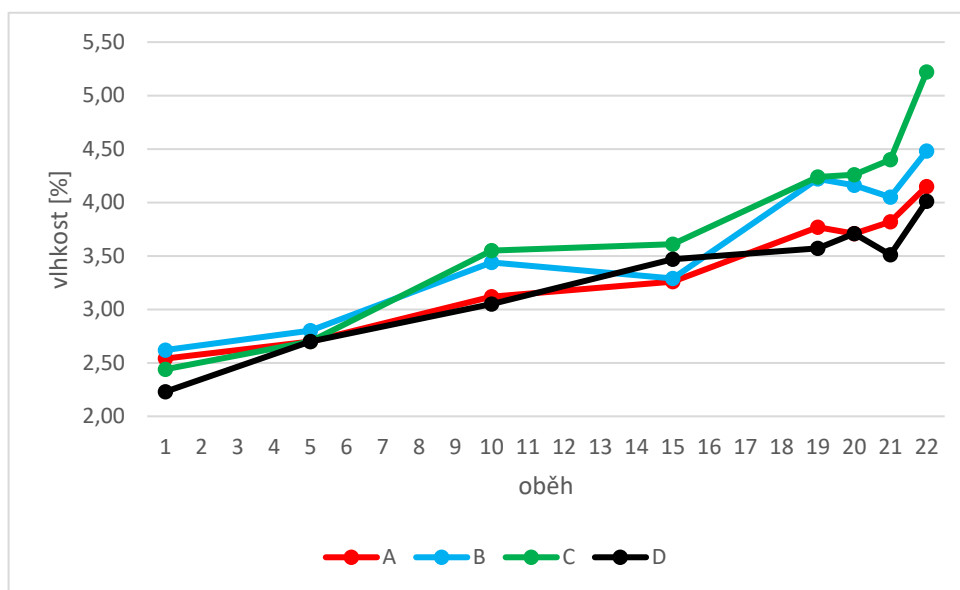
BENTONIT D	1	5	10	15	19	20	21	22
vlhkost [%]	2,23	2,70	3,05	3,47	3,57	3,71	3,51	4,01
spěchovatelnost [%]	46	47	47	47	47	47	46	47
navážka [g]	155,0	154,0	151,0	152,0	149,0	152,5	152,0	146,0
prodyšnost [j. p.]	95	80	65	55	55	55	55	60
vaznost [kPa]	194	206	204	204	204	195	203	208
pevnost ve štěpu [kPa]	31	38	38	34	28	26	32	32
pevnost v kondenzační zóně [kPa]	3,9	3,9	3,3	3,3	3,3	2,9	2,8	3,1
pH [-]	10,10	9,86	9,78	9,80	9,56	9,79	9,80	9,85
vodivost [μS/cm]	345	383	410	424	431	432	435	443
ztráta žiháním [%]	1,8	2,4	3,0	3,2	3,5	3,8	3,9	3,9
vyplavitelné látky [%]	7,18	10,76	17,84	16,44	17,36	18,08	17,78	18,16
středová monofrakce [g]	27,32	25,39	25,98	25,49	25,82	23,27	23,41	23,09
středová monofrakce [ml]	17,0	16,5	16,5	16,5	16,5	14,0	14,0	14,0
ztráta středové monofrakce žiháním [%]	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6
bentonit vypočtený (Heine, Schumacher, Green) [%]	6,2	7,0	7,5	8,0	8,2	8,1	8,0	8,9

Vyhodnocení a srovnání parametrů formovacích směsí v měřených oběžích je uvedeno v následujících podkapitolách.

3.1 Vlhkost směsi

S opakovaným použitím formovací směsi dochází k jejímu zanášení nečistotami z prostředí, degradovanými složkami směsného bentonitu, kousky kovu a roztržitými zrny ostřiva. Všechny takovéto další příměsi zvyšují spotřebu pojiva, které se je snaží, stejně jako zrna ostřiva, obalit. Toto se projevuje kromě jiného vyšší spotřebou vody, která se váže do směsi (Obr. 39).

Nejvíce pohlcuje vodu směs C. Oproti A, D, které jsou na tom nejlépe, má o 25 % vyšší vlhkost. Po 20 oběžích došlo k téměř zdvojnásobení vlhkosti. Ideální hodnota pro bentonitové formovací směsi se má pohybovat pod 3,5 % [3].

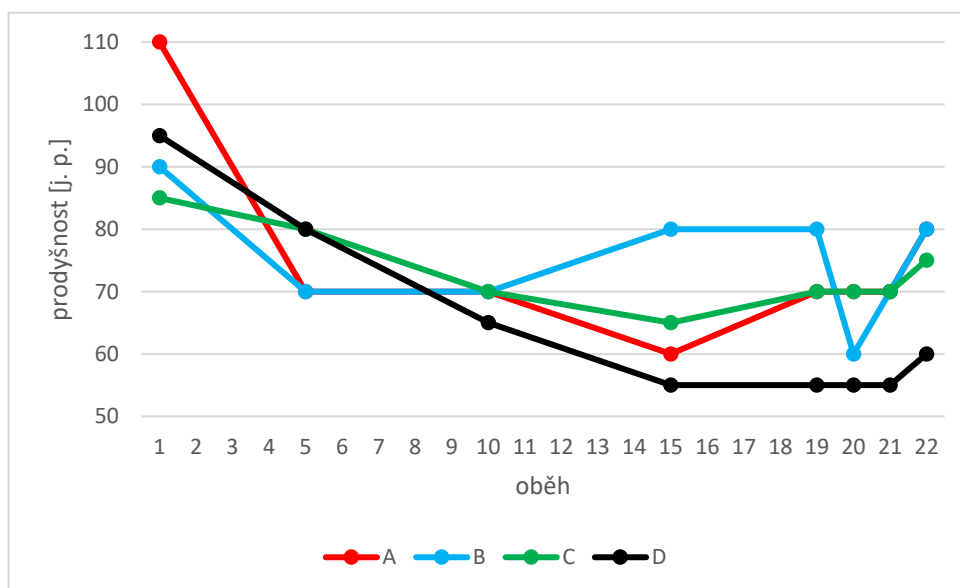


Obr. 39 Vzájemné srovnání směsí dle vlhkosti

Zvyšující se vlhkost se dá také vysvětlit rostoucím množstvím bentonitu ve směsi, což dokazuje zkouška adsorpce metylenové modře dále v práci.

Co se týče odchylek v průběhu hodnot, ty má na svědomí starší kolový mísič. Směs se často lepila na jeho stěny a škrabáky, čímž nedošlo k řádnému promísení. Každá odebraná hrst směsi pak měla jiné vlastnosti, což bylo ověřeno při dosahování požadované spěchovatelnosti.

3.2 Prodyšnost



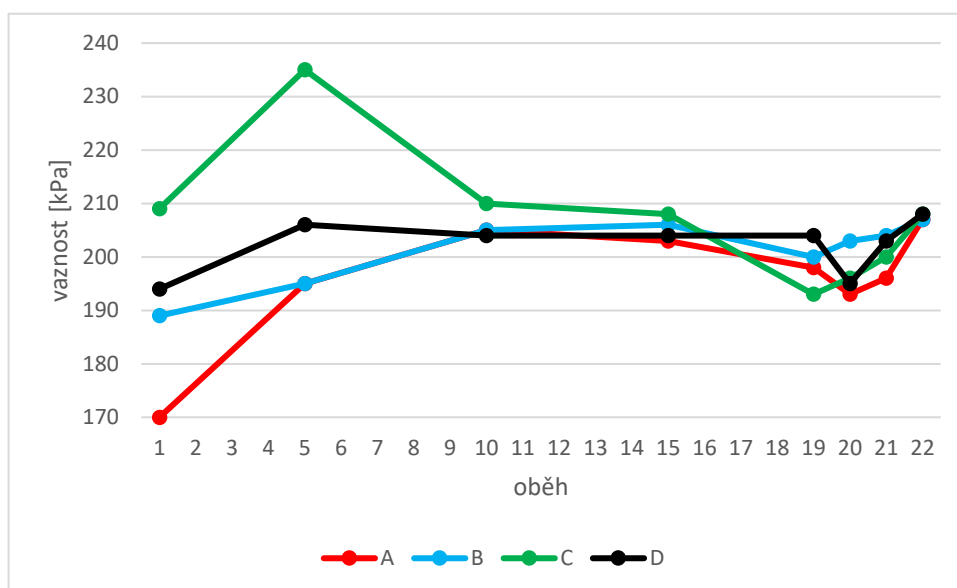
Obr. 40 Vzájemné srovnání směsí dle prodyšnosti

Pokles prodyšnost je hlavně výsledkem zvyšujícího se množství nečistot. Zanášení směsi zbytky kovu, degradovanými složkami bentonitu aj. se zvyšuje obsah vyplavitelných látek, které vyplňují prostor mezi zrny ostřiva a brání tak odchodu plynů – snižují prodyšnost a zvyšují riziko plynových vad v odlitku [25]. Tyto potíže nejvíce hrozí při použití směsi D, kde je pokles prodyšnosti nejviditelnější (Obr. 40).

Počáteční hodnoty by měly být podobné, ale nejsou. To je dáno dodaným ostřivem, které bylo ve vrchní části Big Bagu velmi nehomogenní.

3.3 Pevnosti

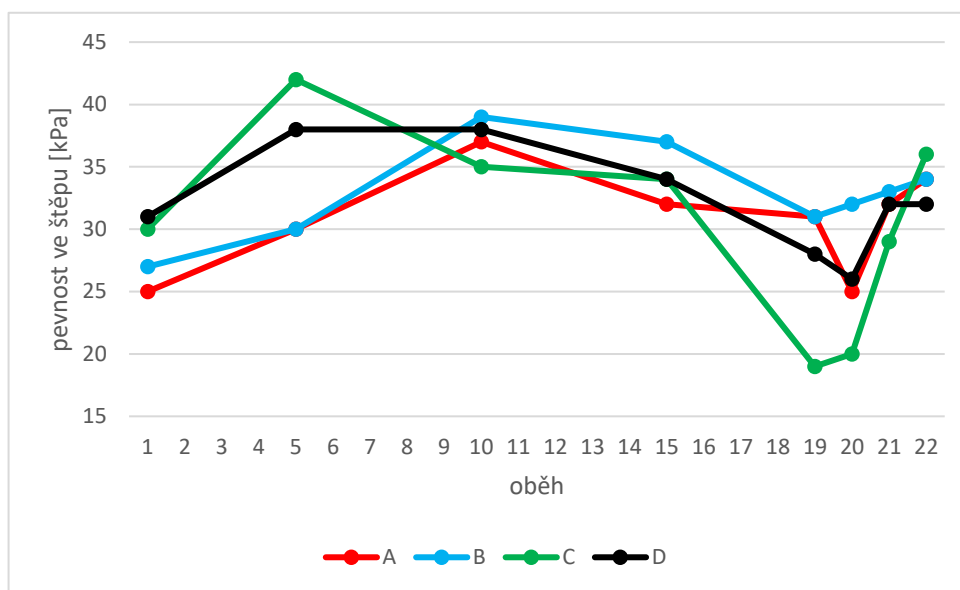
Další oblast, kterou velmi ovlivňuje vlhkost, jsou pevnostní vlastnosti:



Obr. 41 Vzájemné srovnání směsí dle vaznosti (pevnosti v tlaku)

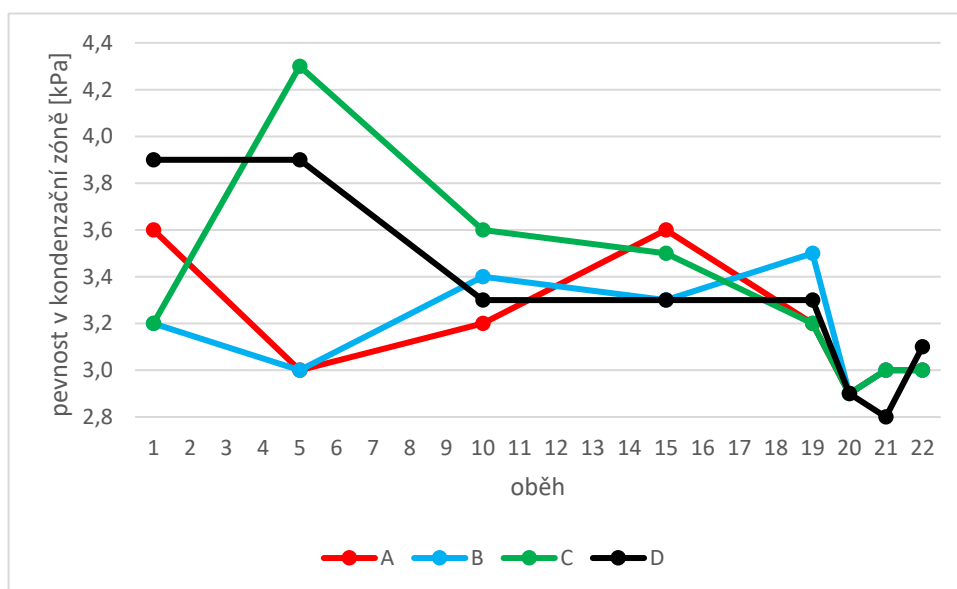
Na měřené pevnosti v tlaku, střihu i v kondenzační zóně (Obr. 41 – Obr. 43) se nárůst vlhkosti silně projevil. U všech 4 bentonitů zpočátku dochází k růstu pevnosti až do maxima, kde se trend obrací na sestupný.

Rozdíly v hodnotách v rámci směsi jsou projevem značné nehomogenity směsi z kolového mísiče. U počátečních hodnot je opět na vině různorodá zrnitost ostřiva.



Obr. 42 Vzájemné srovnání směsí dle pevnosti ve štěpu

Nejvíce patrné to je u pevnosti v kondenzační zóně (PKZ) – Obr. 43. I přesto se nachází v rámci použitelných minimálních hodnot. Dle intervalu, ve které se naměřené PKZ pohybují, se ve všech případech jedná o natrifikovaný bentonit [4].



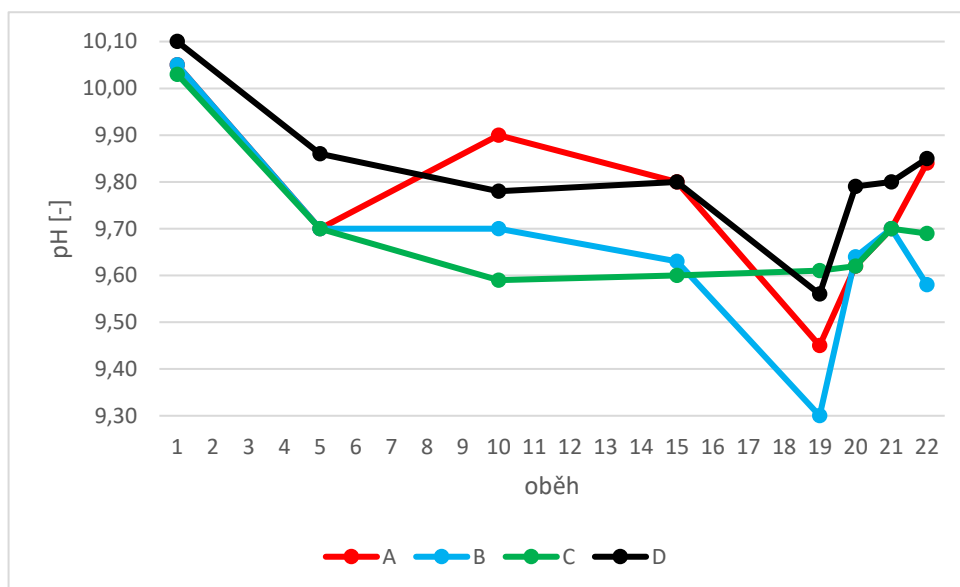
Obr. 43 Vzájemné srovnání směsí dle pevnosti v kondenzační zóně

Hodnoty pevnosti po vysušení (při zadaných teplotách) pro poslední oběh jsou v Tab. 9. Kromě výchozí vlhkosti a teploty vysoušení hraje velkou roli obsah a typ bentonitu a přísad v směsných bentonitech [25]. Tyto údaje ale nejsou k dispozici pro vyhodnocení.

Tab. 9 Pevnost směsí po vysušení [kPa]

PEVNOST V TLAKU PO VYSUŠENÍ [kPa]	150 ° C	300 ° C	400 ° C
směs A - 1. oběh	182	211	218
směs B - 1. oběh	240	186	173
směs C - 1. oběh	230	223	230
směs D - 1. oběh	178	182	121
směs A - 22. oběh	363	350	303
směs B - 22. oběh	383	320	357
směs C - 22. oběh	377	423	365
směs D - 22. oběh	370	360	352

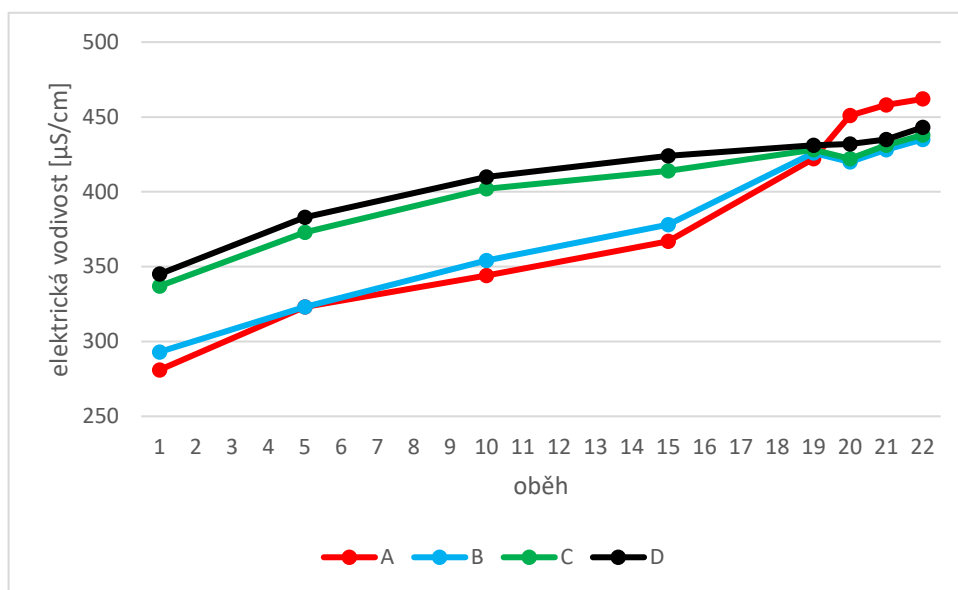
3.4 pH a elektrická vodivost



Obr. 44 Vzájemné srovnání směsí dle pH

Výchozí hodnota odpovídá tepelně nedotčenému bentonitu (Obr. 44). Po odlití degradované složky zvyšují obsah znehodnoceného jílu a pH se tak sníží. Největší pokles zaznamenaly bentonity B a C. Jde ale o pokles o přibližně 5 % a stále se nachází vysoko nad minimální požadovanou hodnotou (pH 8,5 pro bentonitové směsi) [25].

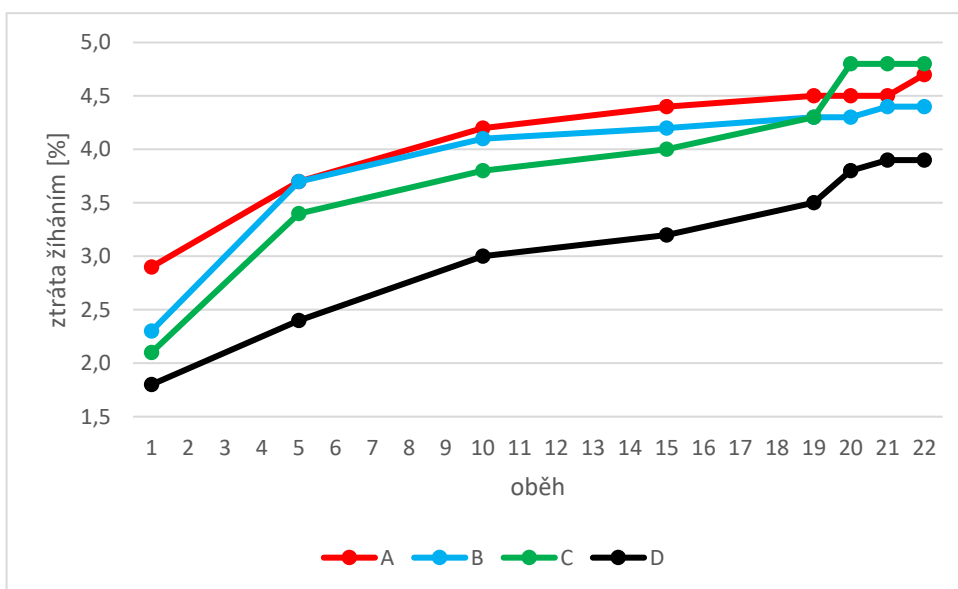
Stoupání elektrické vodivosti (Obr. 45) probíhá dle očekávání, neboť během zkoušky dochází k nárůstu obsahu vyplavitelných látek a aktivního bentonitu vlivem nastaveného ožiování. Kromě nich se na trendu podílí i složení vody, kdy při odpařování odchází pouze destilovaná voda a zanechává ve směsi různé soli. Rozdíly mezi směsmi jsou ovlivněny také použitými přísadami (uhlíkaté a další).



Obr. 45 Vzájemné srovnání směsí dle el. vodivosti

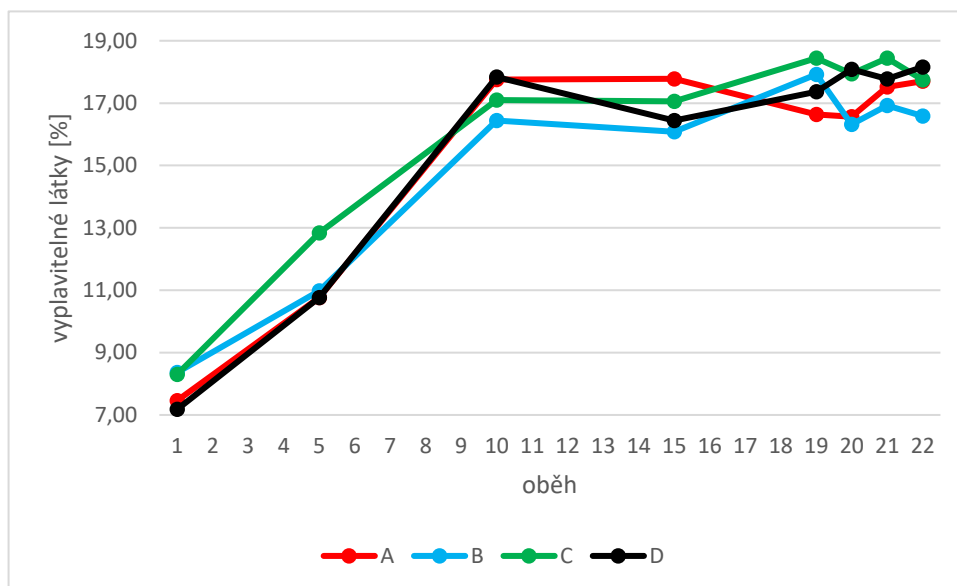
3.5 Spalitelné látky

Při žihání dochází k odpaření spalitelných látek, které udávají přibližnou informaci o obsahu uhlíkatých přísad ve směsi. U bentonitu D jich je viditelně menší množství (přibližně o čtvrtinu viz Obr. 46), než u ostatních. Přibývání spalitelných látek má na svědomí příliš velké množství směsného bentonitu v oživení [12].



Obr. 46 Vzájemné srovnání směsí dle ztráty žiháním

3.6 Vyplavitelné látky



Obr. 47 Vzájemné srovnání směsí dle obsahu vyplavitelných látek

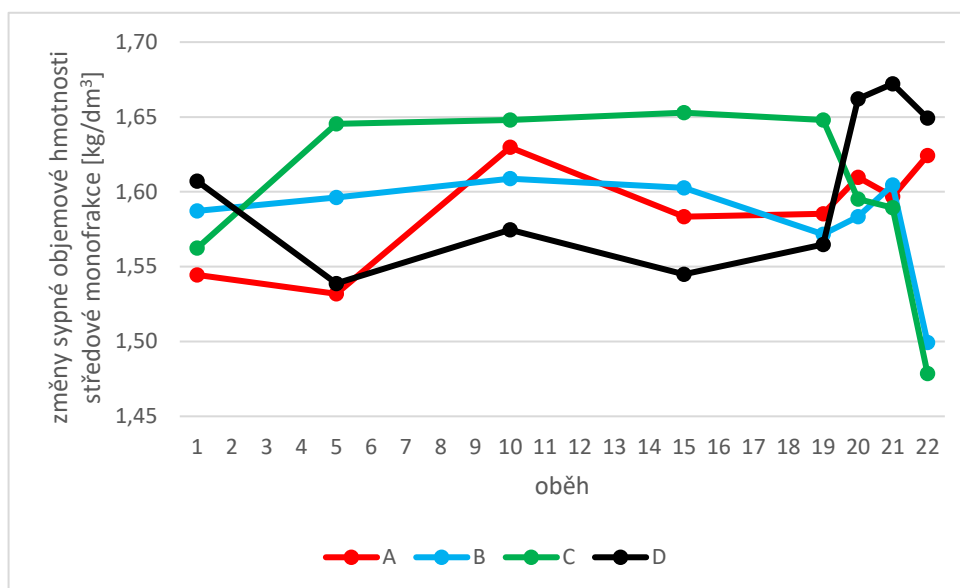
Podíl vyplavitelných látek všech 4 formovacích směsí se po ustálení pohybuje v intervalu 16-19 % viz Obr. 47. Nejlépe na tom je bentonit B.

Dle literatury [3] je vhodné nacházet se v rozmezí 10-14 % vyplavitelných podílů dle požadavků na kvalitu odlitku. Nadměrné množství „výplavu“ se řeší zvýšeným dávkováním nového kvalitního ostřiva v oživení.

Velký měrný povrch jemných podílů má za následek zvýšenou spotřebu pojiva, což navyšuje spotřebu vody a tedy vlhkost (Obr. 39) pro optimální spěchovatelnost. Ve směsi se na množství výplavu podílí kromě pojiva a přísad i ostřivo [6].

3.7 Stupeň oolitizace

Podíl hmotnosti a objemu středové monofrakce (zrn o rozměru 0,200-0,315 mm) se označuje jako sypná objemová hmotnost (zkráceně SOH). Bohužel, kvůli velkému rozptylu parametrů ostřiva mezi počátkem a koncem experimentu jsou zjištěné hodnoty SOH pouze orientační (Obr. 48):



Obr. 48 Porovnání směsí dle průběhu změny sypané objemové hmotnosti monofrakce 0,200 - 0,315 mm

Měření na počátku experimentu se liší, ačkoliv měly být prakticky shodné z důvodu ještě neexistující oolitizace a mělo tedy jít přímo o zrna ostřiva. To poukazuje na ono problematické ostřivo po stránce homogenity a také na použitý typ mísiče. Relativně vodorovný trend průběhu, který má být správně klesající vlivem snižování hustoty povrchu zrn, lze vysvětlit vysokým obsahem nového ostřiva v oživení.

Při zachování současného oživování jde říct, že změny průběhů SOH jsou až do 18. oběhu minimální. To poukazuje na fakt, že pro měření míry oolitizace je třeba provést větší množství oběhů, jak již bylo řečeno dříve. Každopádně lze ale říci, že v počátcích nedochází k podstatnému navýšení oolitizace [12].

Identifikaci oolitizace je lepší řešit na neoživeném vratu než na namísené směsi. Oživení zkresluje přesné hodnoty oolitizace přidáním nového nedotčeného ostřiva. Toto bylo dodatečně změřeno na vratu z 21. oběhu. Míra oolitizace byla tedy posuzována na zhomogenizovaném vratu z konce experimentu, kdy bylo dosaženo přibližně 30 % možných oolitických obálek při současném stupni oživování [12]. Byly získány tyto výsledky – Tab. 10.

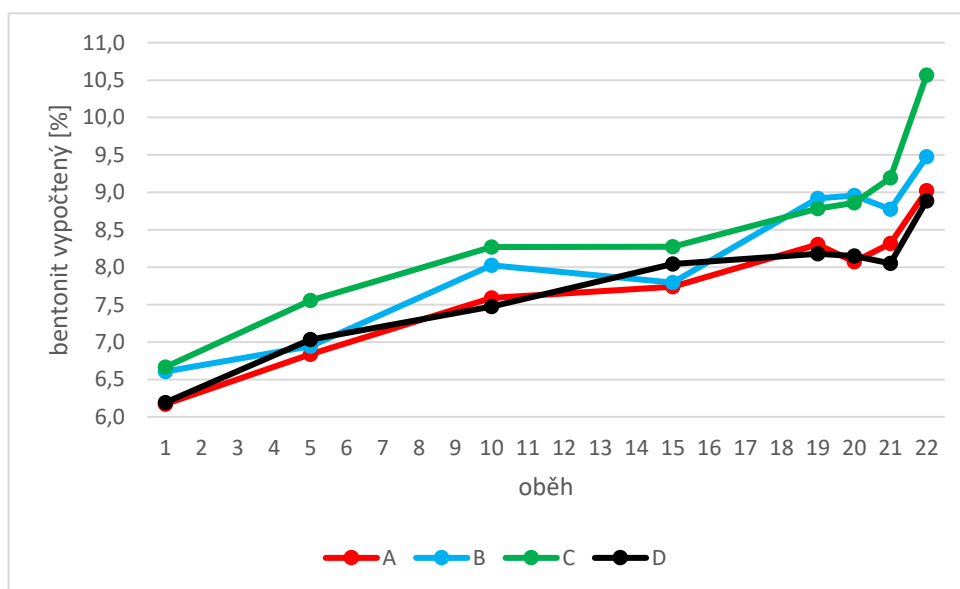
Tab. 10 Srovnání sypaných objemových hmotností vratu z 21. oběhu

Oběh 21	Vrat A	Vrat B	Vrat C	Vrat D	Ostřivo
Hmotnost středové monofrakce [g]	24,41	23,06	24,32	23,96	27,39
Objem středové monofrakce [ml]	16,6	16,0	16,2	16,1	17,6
Sypná objemová hmotnost vratu [kg/dm ³]	1,47	1,44	1,50	1,49	1,56
Rozdíl sypané objemové hmotnosti vratu a ostřiva [kg/dm ³]	0,09	0,11	0,05	0,07	
Oolitizace [%]	5,8	8,0	3,7	4,6	

Dá se předpokládat, že největší sklon k vytváření oolitických obálek má bentonit B. Je u něj tedy zvýšené riziko vzniku zapečenin vlivem snížené tepelné vodivosti [17]. Opačnou tendenci má bentonit C. Aktuálně ale k žádným problémům vlivem oolitizace nedocházelo, neboť negativní účinek se projevuje až při překročení 15 % oolitizace [3]. Přesný stupeň ale nelze stanovit, neboť k správnému vyhodnocení by bylo potřeba alespoň 70 oběhů směsi [12].

3.8 Obsah bentonitu

Vypočtený bentonit se dá použít jako ukázka změn obsahu aktivního bentonitu během průběhu experimentu (Obr. 49). V praxi se využívá k řízení oživování. Jde pouze o orientační hodnotu. Přesné množství udává zkouška sorpce metylenové modře (zkráceně MM).



Obr. 49 Vzájemné srovnání směsí dle vypočteného bentonitu

Rozdíly mezi jednotlivými směsmi jsou dány použitým bentonitem a přísadami. Nastavené přílišné oživení pak způsobuje neustálý růst obsahu aktivního bentonitu.

22. oběh byl dodělán dodatečně v laboratoři na oživeném vratu z 21. oběhu. Odchylka je způsobena lehce odlišnými způsoby přípravy směsi (menší mísič, prostředí laboratoře namísto slévárny...).

V případě měření sorpce MM (Tab. 11) bylo zanedbáno měření nového faktoru MM v dny zkoušek, proto zůstaly použitelné pouze hodnoty prvního a posledního oběhu (při kterém se na tuto skutečnost přišlo). I tak rozdíl 2 hodnot potvrzuje to, co říká vypočtený bentonit – obsah aktivního bentonitu ve směsích stoupá.

Tab. 11 Vzájemné srovnání směsí dle adsorpce metylenové modře

adsorpce MM [mg MM/g vzorku]	směs A	směs B	směs C	směs D
oběh 1	22,50	21,59	22,37	23,74
oběh 22	27,18	32,56	33,59	31,87

Výchozí obsah aktivního jílu byl u všech směsných bentonitů podobný – okolo 7 %. Rozdíly se projeví až s časem. Směsi B, C, D se dostaly až nad 9 % akt. bentonitu, která je dle literatury [25] horní hranicí optimálních podmínek. Kromě přehnaně vysokého množství nových surovin (bentonitu) v oživení se na výsledných hodnotách (Tab. 12) projevuje i složení bentonitu a přísad.

Tab. 12 Vzájemné srovnání směsí dle množství aktivního bentonitu

množství aktivního bentonitu [%]	směs A	směs B	směs C	směs D
oběh 1	7,1	6,7	7,0	7,1
oběh 22	8,6	10,1	10,5	9,6

3.9 Obsah uhlíku a síry

Množství uhlíku a síry v prvním oběhu lze nalézt v Tab. 13 a Tab. 14. S opakovaným užíváním směsi se obsah obou prvků zvýšil u všech 4 receptur, což lze připsat vysoké míře oživování.

Tab. 13 Vzájemné srovnání směsí dle obsahu uhlíku

obsah C (celkový) [%]	směs A	směs B	směs C	směs D
oběh 1	1,17	0,98	0,95	0,61
oběh 19	2,27	2,03	2,13	1,34
oběh 20	2,41	2,00	2,07	1,46
oběh 21	2,58	2,20	2,22	1,42
oběh 22	2,61	2,33	2,30	1,54

Tab. 14 Vzájemné srovnání směsí dle obsahu síry

obsah S [%]	směs A	směs B	směs C	směs D
oběh 1	0,020	0,022	0,024	0,017
oběh 19	0,039	0,046	0,047	0,039
oběh 20	0,046	0,042	0,048	0,044
oběh 21	0,050	0,055	0,054	0,045
oběh 22	0,053	0,054	0,053	0,045

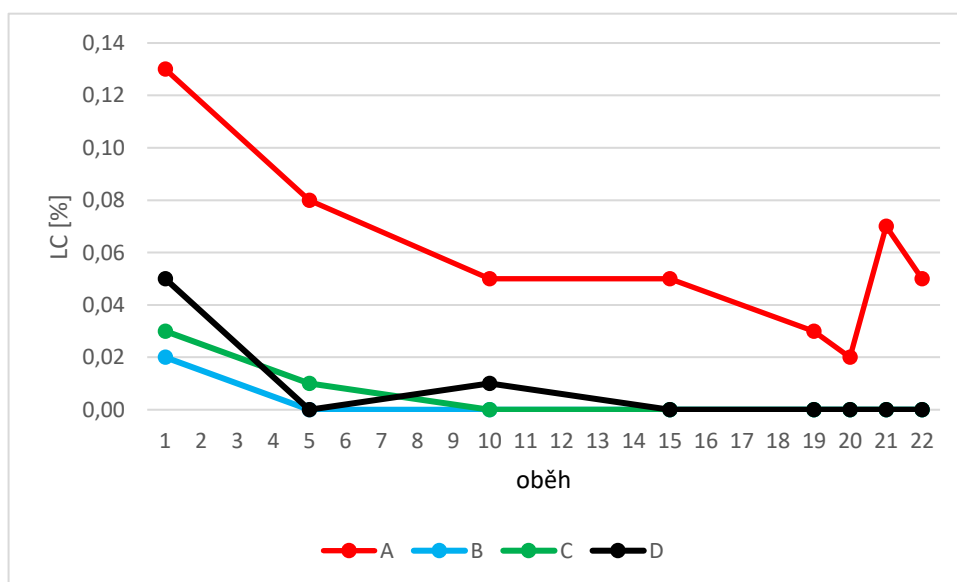
Uhlík je nejvyšší u směsi A. To je dáno vysokým množstvím nosiče lesklého uhlíku v tomto směsném bentonitu viz Obr. 50. V případě síry jsou jejím hlavním zdrojem též uhlíkaté přísady. Její zvýšený obsah může mít negativní dopady na strukturu odlitku, u litin hlavně na tvar grafitu.

3.10 Množství lesklého uhlíku

Množství lesklého uhlíku – LC (v Tab. 15 a graficky na Obr. 50), měřené firmou KERAMOST, a.s., bylo upřesněno pomocí výsledků ze zkoušky sorpce metylenové modře viz Tab. 16 a Tab. 17.

Tab. 15 Množství lesklého uhlíku v jednotlivých obězích

LC bez korekce na MM [%]	směs A	směs B	směs C	směs D
oběh 1	0,13	0,02	0,03	0,05
oběh 5	0,08	0,00	0,01	0,00
oběh 10	0,05	0,00	0,00	0,01
oběh 15	0,05	0,00	0,00	0,00
oběh 19	0,03	0,00	0,00	0,00
oběh 20	0,02	0,00	0,00	0,00
oběh 21	0,07	0,00	0,00	0,00
oběh 22	0,05	0,00	0,00	0,00



Obr. 50 Srovnání množství LC (bez korekce na MM) ve formovací směsi

Trend poklesu změřeného množství lesklého uhlíku souvisí se stoupající vlhkostí směsi. Jelikož uhlík reaguje nejdříve s kyslíkem, zvýšené množství vody v bentonitové

směsi snižuje finální množství LC. Výkyvy v průběhu jsou ukázkou nevhodného mísení, kdy obsah LC mohl být v každém odebraném vzorku různý.

Směsný bentonit A má asi 5x vyšší obsah LC, jak všechny ostatní směsi. Pro lepší informaci o lesklém uhlíku v ostatních bentonitech je potřeba upravit výsledky pomocí korekce na sorpci metylenové modře:

Tab. 16 Množství LC s korekcí na MM u prvního oběhu

vzorek	A	B	C	D
oběh	1	1	1	1
LC bez korekce [%]	0,13	0,02	0,03	0,05
MM [mg MM/g]	22,50	21,59	22,37	23,74
LC s korekcí na MM [%]	0,30	0,08	0,10	0,08

Tab. 17 Množství LC s korekcí na MM u posledního oběhu

vzorek	A	B	C	D
oběh	22	22	22	22
LC bez korekce [%]	0,05	0,00	0,00	0,00
MM [mg MM/g]	27,18	32,56	33,59	31,87
LC s korekcí na MM [%]	0,25	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,04

V případě, že bylo naměřeno 0 % LC bez korekce, pak hodnota LC s korekcí na MM je menší nebo rovna hodnotě, která je v tabulce. Důvodem je to, že není známo, kolik uhlíku zreagovalo s kyslíkem (především obsaženém ve vodě v bentonitu). Jinak řečeno, zda se spotřeboval „všechn“ dostupný lesklý uhlík anebo jen část [12].

Efekt LC na kvalitu povrchu odlitku nelze po tryskání dobře hodnotit. Při zkoumání na metalografickém výbrusu neotryskaného vzorku nebyly patrné rozdíly mezi oběhy ani jednotlivými směsmi. Nedošlo k penetraci kovu, obsah LC je tedy dostatečný.

3.11 Vaznost formy

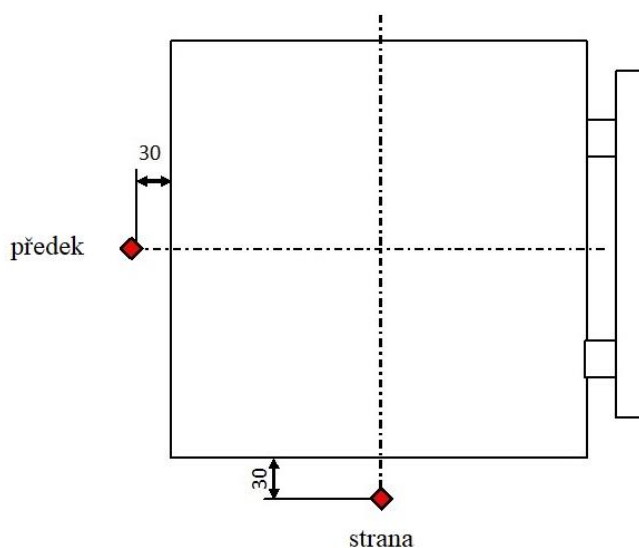
Součástí hodnocení experimentu bylo určení množství formovací směsi ulpělé na odlitku, přesněji na jeho spodní straně. Na velikosti této vrstvy může mít vliv také stupeň zhutnění formy. Zadavatel požadoval hodnocení vaznosti v dělicí rovině na části formy vyrobené přístrojem Foromat 20, která byla při experimentu hodnocena vaznoměrem GF. Místa měření vaznosti ve spodku formy jsou patrná z Obr. 51. Měření vaznosti ve formě byla prováděna v místě vršku odlitku, vpředu a na straně, vždy uprostřed stěny cca 30 mm od hrany odlitku. Výsledky hodnocení vaznosti jsou uvedeny v Tab. 18.

Tab. 18 Střední hodnoty vaznosti naměřené ve vršku formy [N.cm²]

oběh	A		B		C		D	
	strana	předek	strana	předek	strana	předek	strana	Předek
5	10	10,8	10,7	11,5	11,4	11,7	10,7	11,4
6	10	10,7	9,6	10,1	9,8	10,4	9,7	10,3
10	9,8	10,8	11,9	12,2	10,2	10,7	9	11,6
15	9,5	11,4	9,7	10,2	9	9,7	9	10,2
18	9,7	10	9,7	10	8,5	9,5	9,7	10,2
19	8,7	10,2	9,8	11	9	9,6	9,9	11,2
20	9,1	10,4	9,5	10,7	8,8	9,3	9,1	10,4
21	8,9	10	9,8	10,5	9,5	10	9,5	10,9

Vaznost spodní poloformy, pýchované na střešacím stroji s dolisováním, se držela v rozmezí 9–12 N.cm². Podařilo se ji udržet s minimálním rozptylem. Rozdíly jsou tedy způsobené především použitými surovinami.

◆ Místa měření
vaznosti formy



Obr. 51 Grafické znázornění míst měření vaznosti formy ve spodku formy

3.12 Vyhodnocení ulpělé směsi

Naměřené hmotnosti vzorků před a po otryskání jsou uvedeny v Tab. 19 až Tab. 22, graficky pak na Obr. 52. V tabulkách je uveden i rozdíl hmotnosti vztahený na danou plochu vzorku (170 x 170 mm) a přepočítaný na velikost plochy odlitku 1 cm² a 1 m².

Tab. 19 Množství ulpělé směsi - bentonit A

bentonit	A				
č. oběhu	před [g]	po [g]	rozdíl [g]	[g/cm²]	[g/m²]
3	1691,51	1672,95	18,56	0,06	642
5	1905,95	1883,09	22,86	0,08	791
13	1312,62	1283,38	29,24	0,10	1012
15	1059,69	1034,14	25,55	0,09	884
18	1428,75	1402,88	25,87	0,09	895
19	894,70	869,68	25,02	0,09	866
20	1388,59	1362,74	25,85	0,09	894
21	1486,37	1459,13	27,24	0,09	943

Tab. 20 Množství ulpělé směsi - bentonit B

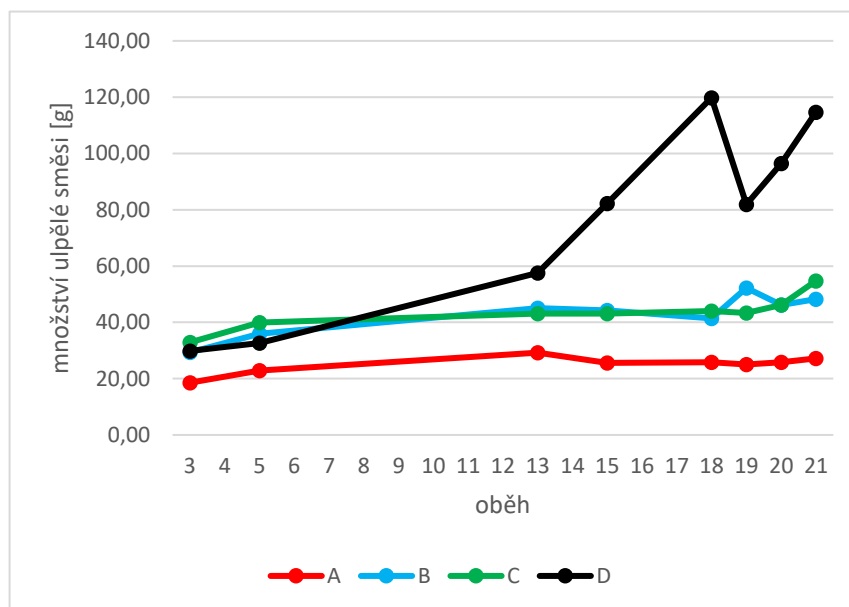
bentonit	B				
č. oběhu	před [g]	po [g]	rozdíl [g]	[g/cm²]	[g/m²]
3	1707,89	1678,53	29,36	0,10	1016
5	1048,73	1012,72	36,01	0,12	1246
13	1109,56	1064,53	45,03	0,16	1558
15	1432,34	1388,05	44,29	0,15	1533
18	1218,49	1177,10	41,39	0,14	1432
19	683,68	631,44	52,24	0,18	1808
20	991,67	945,43	46,24	0,16	1600
21	1416,19	1367,90	48,29	0,17	1671

Tab. 21 Množství ulpělé směsi - bentonit C

bentonit	C				
č. oběhu	před [g]	po [g]	rozdíl [g]	[g/cm²]	[g/m²]
3	1271,21	1238,33	32,88	0,11	1138
5	1197,46	1157,53	39,93	0,14	1382
13	1218,01	1174,85	43,16	0,15	1493
15	1856,90	1813,73	43,17	0,15	1494
18	1214,32	1170,28	44,04	0,15	1524
19	1512,51	1469,21	43,30	0,15	1498
20	1325,70	1279,51	46,19	0,16	1598
21	1592,95	1538,20	54,75	0,19	1894

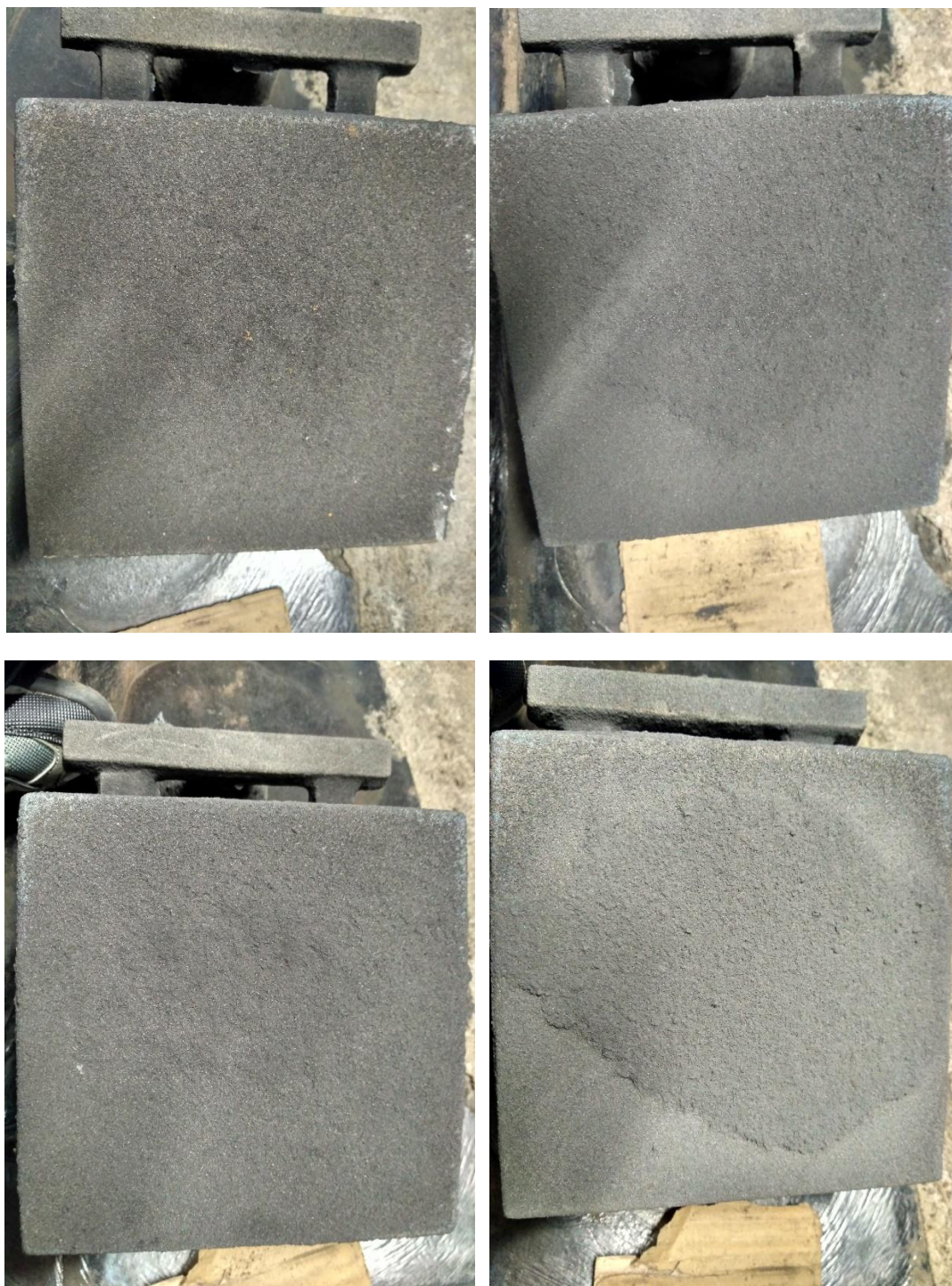
Tab. 22 Množství ulpělé směsi - bentonit D

bentonit	D				
č. oběhu	před [g]	po [g]	rozdíl [g]	[g/cm ²]	[g/m ²]
3	1554,44	1524,58	29,86	0,10	1033
5	999,08	966,45	32,63	0,11	1129
13	1386,05	1328,51	57,54	0,20	1991
15	1479,97	1397,74	82,23	0,28	2845
18	1221,03	1101,24	119,79	0,41	4145
19	1105,63	1023,78	81,85	0,28	2832
20	1166,13	1069,68	96,45	0,33	3337
21	1579,87	1465,27	114,60	0,40	3965



Obr. 52 Rozdíly v množství ulpělé formovací směsi

Z hodnot lze jasně vidět, že počáteční oběhy vykazují podobně nízké ulpívání formovací směsi na odlitku u všech 4 směsných bentonitů. Na odlitku z 8. oběhu, který byl odlit do směsi D, byl nalezen viditelný příbytek ulpělé směsi a s dalšími oběhy toto množství narůstalo viz Obr. 54. Směs také mnohem citelněji drží v rámu, a to především v rozích. Ostatní bentonity jsou na tom lépe, ulpívání směsi u nich roste téměř zanedbatelně. Výsledky se potvrzují i po vizuální stránce – Obr. 53 (při prvotních obězích vypadaly všechny stejně, proto je zobrazen pozdější oběh). Nejmenší množství ulpělé směsi je u bentonitu A, téměř poloviční oproti B a C. Důvod ulpívání směsi na povrchu je řešen v sekci metalografie. Nárůst objemu ulpělé směsi na odlitku D je problém složení směsného bentonitu. Nejde o jíl, neboť ten na tom, dle zjištěného stupně znehodnocení bentonitu (Tab. 23), není nejhůře. Problémem jsou nejspíše obsažená aditiva [3].



Obr. 53 Oběh 19, netryskané, směs A (vlevo nahoře), směs B (vpravo nahoře), směs C (vlevo dole) a směs D (vpravo dole)



Obr. 54 Směs D - oběh 1 (vlevo nahoře), oběh 8 (vpravo nahoře), oběh 12 (vlevo dole) a oběh 20 (vpravo dole)

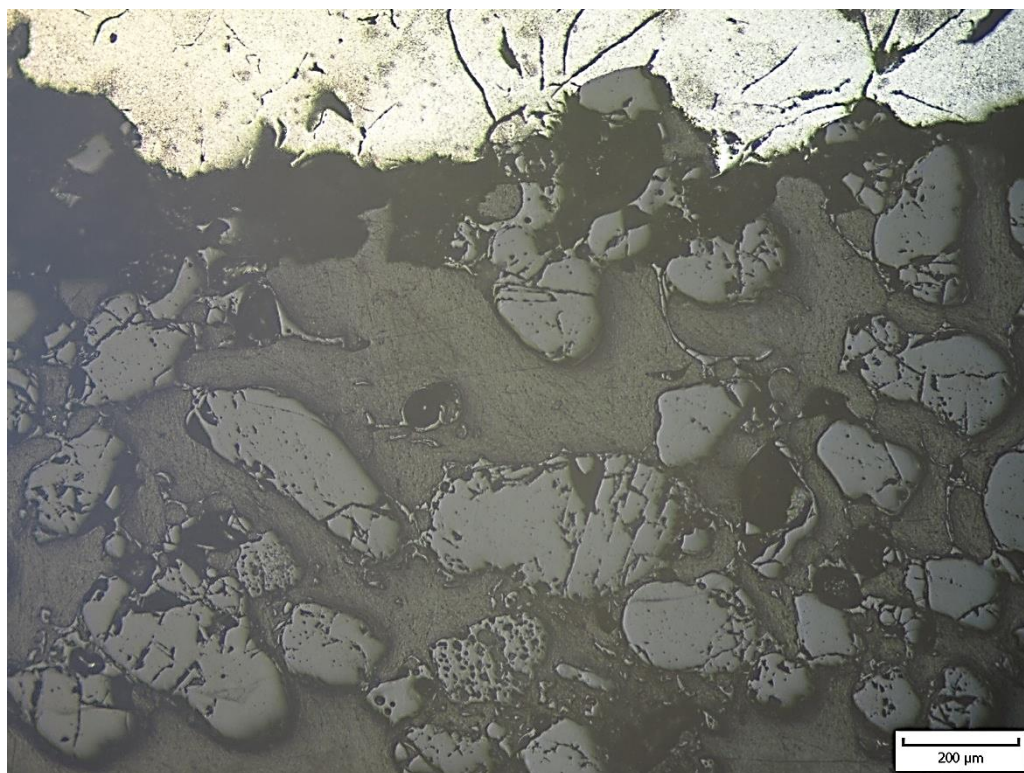
Zvyšující se množství ulpívající směsi se liší dle složení bentonitu a přísad použitých ve směsi.

3.13 Vyhodnocení metalografie

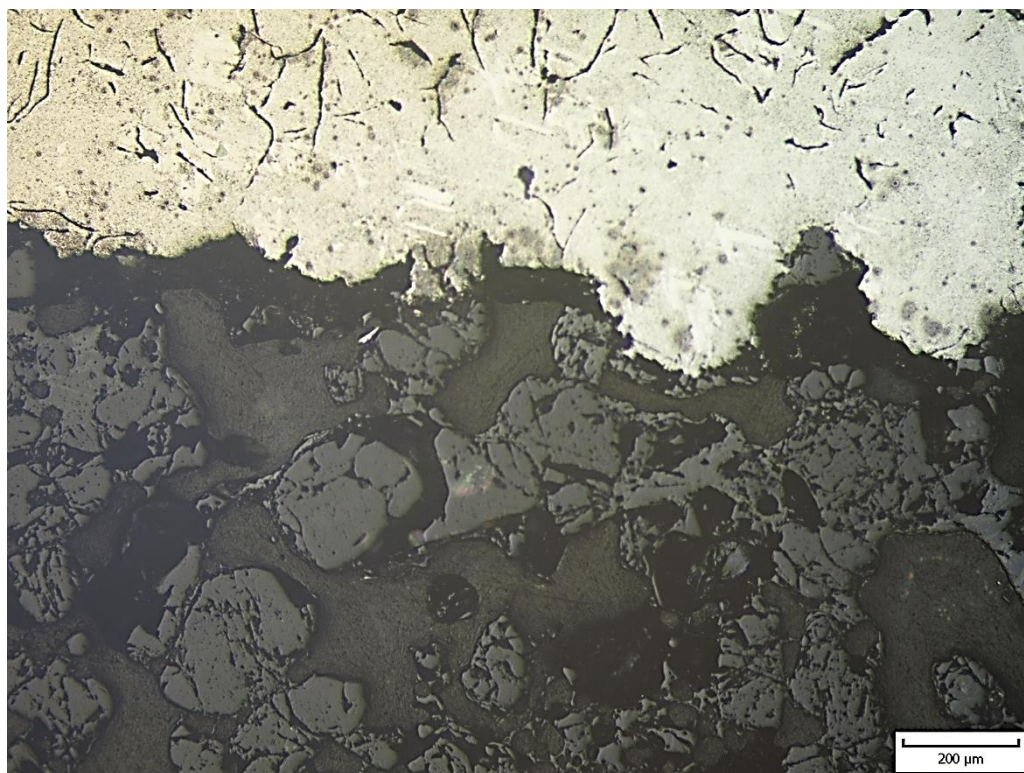
3.13.1 Mechanická penetrace

Tento jev se neobjevil prakticky u žádné směsi, jak je vidět na Obr. 55 – Obr. 58 (40x, neleptané, oběh č. 20). Kov se do formy nedostal. Z obrázku je patrná pouze hrubost povrch formy, kvůli které drží směs na odlitku.

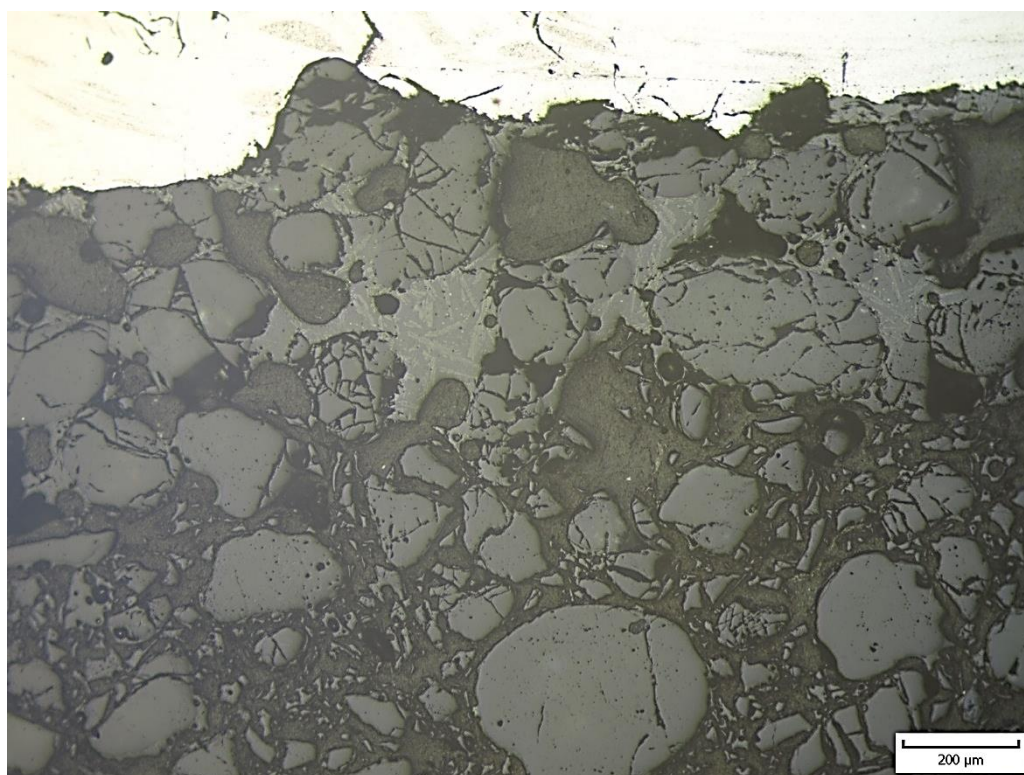
Směsi odolaly penetraci zabíhavé litiny i přes klesající množství lesklého uhlíku (Obr. 50), který průniku kovu brání.



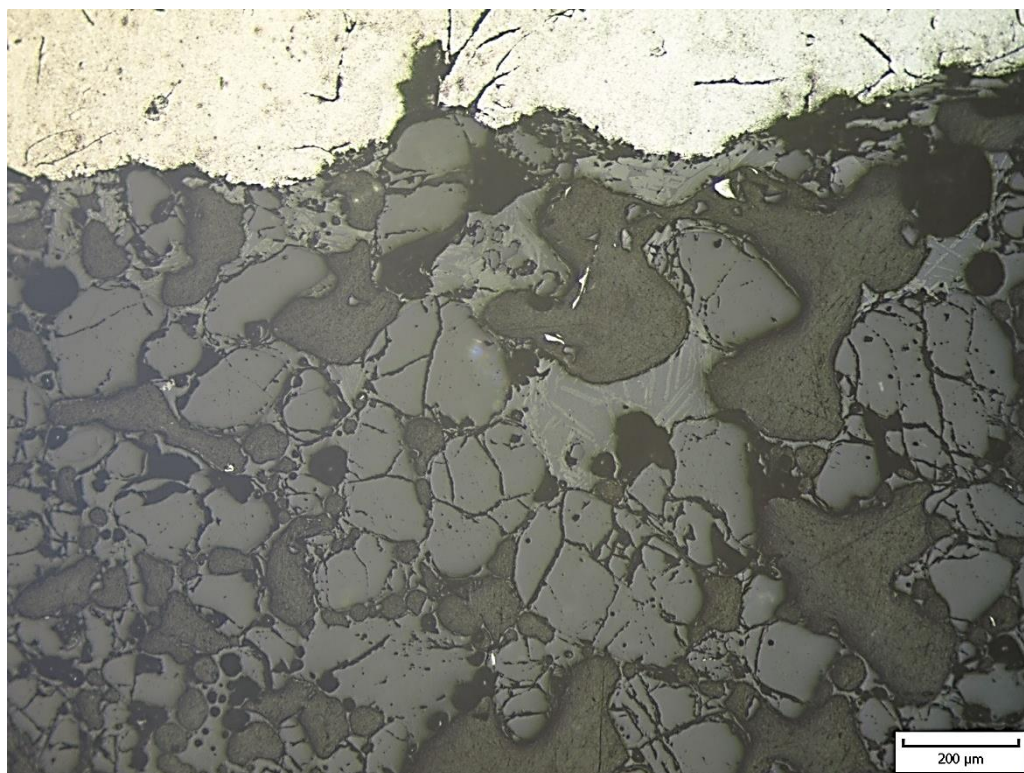
Obr. 55 Odlitek litý do směsi A



Obr. 56 Odlitek litý do směsi B



Obr. 57 Odlitek litý do směsi C



Obr. 58 Odlitek litý do směsi D

3.13.2 Chemická penetrace

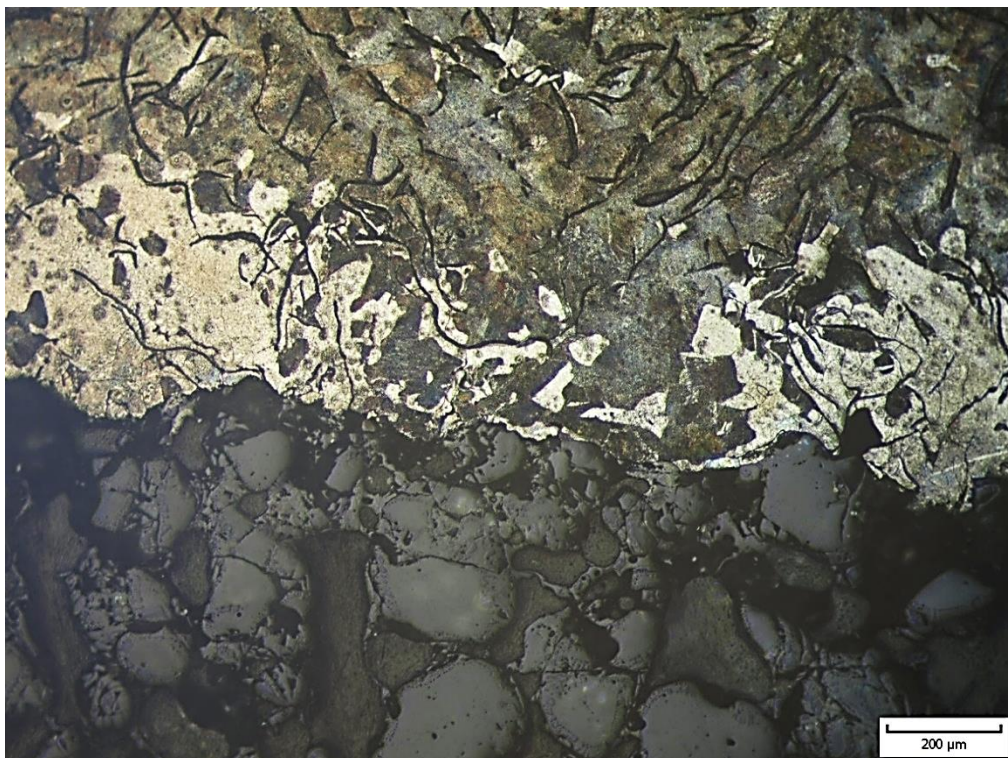
Přesněji vznik fayalitu – produktu reakce FeO s křemenným ostřivem za tepla. FeO vzniklo reakcí kyslíku s kovem během odlévání. Fayalit, s nízkou teplotou tavení kolem $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, přináší v tomto případě riziko „spékání“ zrn formovací směsi [17].

Chemická penetrace se vyskytuje výhradně v místech oduhličení povrchu kovu na rozhraní s formou. Úbytek uhlíku byl viditelný u některých vzorků už na neleptaných verzích formou slabších útvarů grafitu (ukázka – Obr. 59), než jaké byly dále od rozhraní.

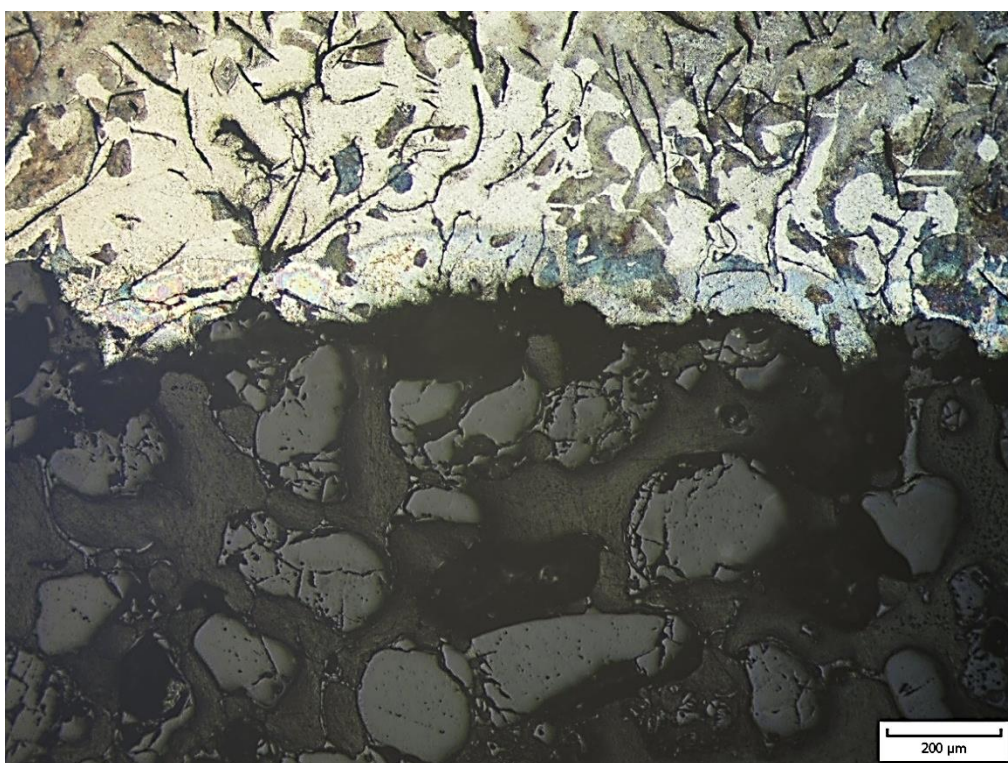


Obr. 59 Oduhličení viditelné na neleptaném vzorku (směs A, oběh 15)

Mnohem průkaznější je ale leptaný stav, kdy se zvýrazní a odliší zrna feritu a perlitu. Odlitek samotný ztuhlul kompletně celý perliticky – tmavá část struktury viděná mikroskopem. Chybějící uhlík v oduhličené oblasti znamená, že se zde vyskytuje ferit, který je na snímcích jako bíle zbarvená oblast (Obr. 60 až Obr. 63).



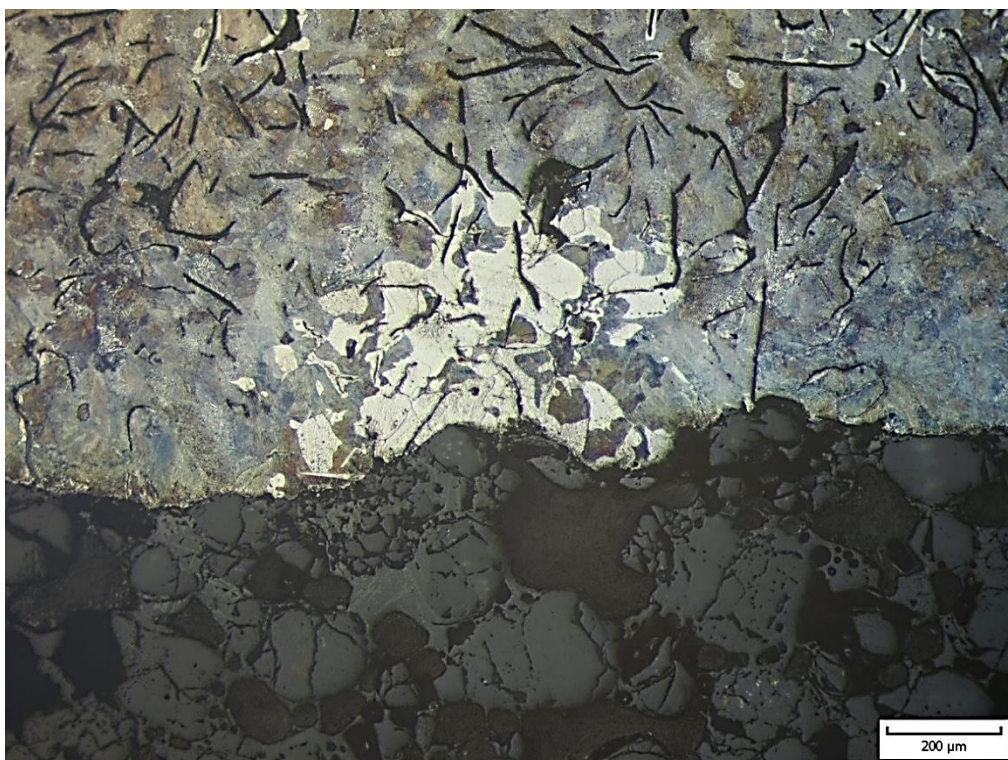
Obr. 60 Oduhličení (směs A, oběh 15)



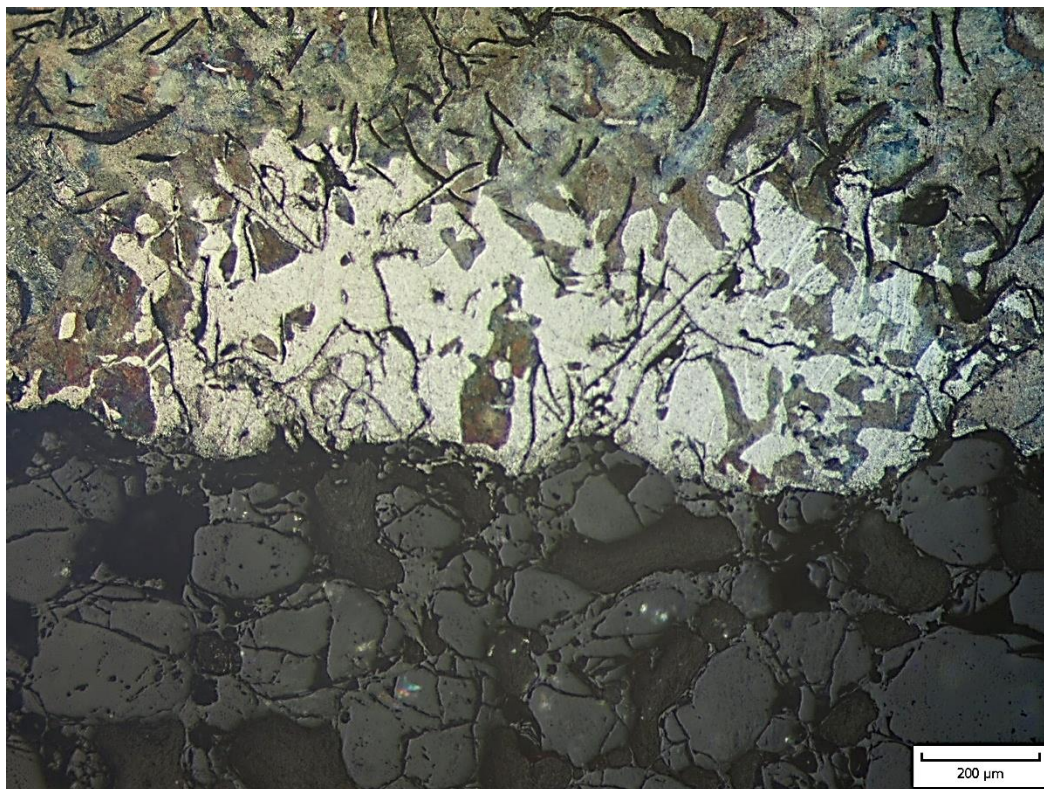
Obr. 61 Oduhličení (směs A, oběh 20)

Cílem zkoumání byly oběhy 15 a 20. U obou oběhů došlo k oduhličení jen u směsi A, jak je vidět na Obr. 60 a Obr. 61. Vyfoceny jsou největší úseky obsahující oduhličení. Celkově bylo u jejich povrchů málo oduhličených zón, rozměrově taktéž nevelké. Rozdíly mezi oběma oběhy nebyly nijak výrazné.

U ostatních směsí bylo oduhličení přítomno až ve 20. iteraci směsi, u bentonitu B dokonce vůbec žádné oduhličení nalezeno nebylo i při opětovném vyleštění a leptání. Nejvíce feritických oblastí obsahoval vzorek odlitku litého do směsi A.



Obr. 62 Oduhličení (směs C, oběh 20)



Obr. 63 Oduhličení (směs D, oběh 20)

Na rozhraní kovu a formy, v místech chybějícího grafitu, mohlo tedy dojít k chemické penetraci. Tento jev se běžně zkoumá na elektronovém mikroskopu provedením selektivní chemické analýzy na povrchu zrn. Metoda nebyla potřeba ze 2 důvodů.

- 1) Konzultace docenta A. Záděry (VUT FSI, Odbor slévárenství) – průzkum fotografií metalografického výbrusu při zvětšení 200x nevykazoval žádnou podezřelou viditelnou vrstvu na povrchu zrn u rozhraní.
- 2) Z dlouholeté praxe je prokázáno, že při dostatečném množství uhlíku (v kovu nebo formovací směsi) k chemické penetraci vůbec nedochází. V tomto případě, tedy kombinace bentonitové formovací směsi obsahující uhlíkaté přísady a litiny s lupínkovým grafitem, byl dostatek uhlíku zaručen [32].

Na první pohled se může zdát, že zkouška nebyla potřeba, ale byla provedena kvůli tomu, že některé ze 4 zkoušených směsí jsou nové produkty.

Povrch odlitků tedy není hrubý kvůli penetraci kovu do formy. Jde pouze o drsný povrch (Obr. 35 dole) způsobený povrchem formy – hrubostí ostríva [8].

Jiné vady nalezeny nebyly. Všechna nejasná místa, pozorovaná světelným mikroskopem, byla kontrolována na stereolupě s větší hloubkou ostrosti. Šlo pouze o díry mezi zrny nebo rozbitá zrna, která mikroskop zachytil špatně. Fotografie ze stereolupy nejsou přiloženy z toho důvodu, že fotoaparát byl připojen pouze na 1 objektiv, a tedy neměl použitelnou hloubku ostrosti. Výsledné snímky byly stejně problematické, jako ty z mikroskopu.

3.14 Stupeň znehodnocení bentonitu

Pro zhodnocení ztrát složek směsi (jejich degradace) je třeba dosáhnout ustáleného stavu. Toho směs dosahuje po 40-60 obězích. Už po 20 použitích směsi se ale dá hodnotit její termostabilita. Z tohoto důvodu se stupeň znehodnocení složek směsi kontroloval až na konci experimentu. Vratné směsi z 21. oběhu byly proto v laboratoři oživeny jako při přípravě 22. oběhu. Na těchto směsích byl změřen obsah aktivního bentonitu pomocí metylenové modře, vaznost, vlhkost a spěchovatelnost. Z posledních 3 veličin byl vypočten obsah bentonitu podle Heineho [3], který slouží pro kontrolu.

Dávka do mísiče činila 68 kg směsi. Z parametrů oživování (Tab. 2) a znalosti obsahu bentonitu ve všech 4 směsných bentonitech (81 % pro směsi A, B a C, 89 % pro D) byl spočítán podíl bentonitu v oživení a stupeň oživení dle rovnice (2.6). Získané hodnoty jsou v Tab. 23:

Tab. 23 Hodnoty pro výpočet stupně znehodnocení bentonitu na konci experimentu

22. OBĚH	A	B	C	D
Stupeň oživení [%]	3,7	3,7	3,7	3,6
Podíl bentonitu v oživení [%]	32,21	32,21	32,21	32,42
Obsah aktivního bentonitu [%]	8,6	10,1	10,5	9,6
Vypočtený bentonit podle Heine [%]	9,0	9,5	10,6	8,9

Z hodnot výše za použití rovnice (2.7) byly zjištěny tyto stupně znehodnocení:

Tab. 24 Stupeň znehodnocení bentonitu na konci experimentu

22. OBĚH	A	B	C	D
Stupeň znehodnocení bentonitu [%] (MM)	10,65	8,49	8,02	9,27
Stupeň znehodnocení bentonitu [%] (Heine)	10,01	9,28	7,91	10,30

Termostabilita se projevuje tak, že u stabilnějšího bentonitu se znehodnotí méně procent z celkového množství směsi a výsledkem je vyšší konečný obsah bentonitu a nižší stupeň znehodnocení. Ze zjištěných hodnot lze konstatovat, že všechny hodnocené bentonity (A-D) mají obdobný stupeň znehodnocení, a tedy i termostabilitu. Nejlépe vychází bentonity B a C, které jsou dle výsledku v Tab. 24 mírně lepší než ostatní.

Oproti obvyklé celkové ztrátě bentonitu ve slévárnách litiny, jež činí asi 5 % [12], jde u všech bentonitů o dvojnásobek. V tuto chvíli se jeví, že by bylo vhodné zvýšit přísun oživujících surovin. Je ale nutno podotknout, že zjištěná hladina 5 % byla nalezena na plně ustálené formovací směsi, tedy alespoň 60 oběhů. Průběh hodnot stupně znehodnocení je totiž až do ustálení klesající viz [12].

Stejným způsobem lze hodnotit ztráty dalších složek (lesklého uhlíku, jiných aditiv), ale z důvodu neznámého složení směsných bentonitů analyzovány nebyly.

3.15 Ekologie

Zkoušky u firmy EMPLA ukázaly na problematické oblasti při dlouhodobějším používání směsných bentonitů, co se ekologie týče. Z mnoha testovaných složek byly problémové tyto: BTEX (karcinogenní látky v čele s benzenem) [33] u všech čtyř, u dvou pak obsahy rozpuštěných látek a v jednom případě přemíru DOC (rozpuštěného organického uhlíku). Procentuální překročení povolených limitů je v Tab. 25.

Tab. 25 Překročení ekologických limitů [%]

[%]	A	B	C	D
BTEX	780	580	620	370
Rozpuštěné látky	✓	✓	400	110
DOC	✓	✓	✓	10
Ostatní látky a prvky (As, Cd, Pb, PCB, TOC...)	✓	✓	✓	✓

Jako nejméně problematický vychází bentonit B. Společně se směsí A se potýkaly pouze s nadměrným množstvím parametru BTEX. Jeho obsah je u směsi A téměř osminásobný a u vzorku B asi šestinásobný v porovnání s povolením. Jelikož ale oba u jiných parametrů plně obstály, celková ekologická kvalita je hodnocena jako velmi vysoká. Vzorek C je co do BTEX hodnoty velmi podobný B, ale navíc má zvýšenou vyluhovatelnost rozpuštěných látek. V případě směsi D jde o nejnižší překročení parametru BTEX a menší přemíru přípustných rozpuštěných látek, avšak obsah org. uhlíku je na hranici oproti ostatním třem bentonitům.

Vzhledem k neznámé skladbě přísadových složek nelze určit, zda bude převažovat vývin BTEX plynů anebo naopak jejich pohlcování. Výpary jsou zdravotně nežádoucí pro pracovníky slévárny. V případě části směsi, které se slévárna zbavuje, je kvůli jejímu nasycení benzenem nepoužitelná pro další využití a problematicky se likviduje [34].

Obecný nešvar bentonitových směsí je tedy dodržení povoleného BTEX limitu. Kvůli nutnosti používat nosiče lesklého uhlíku (k zaručení kvalitního povrchu), který je prakticky jediný hlavní problém moderních bentonitových směsí, je celková kvalita bentonitových směsí po ekologické stránce vysoká.

ZÁVĚR

Od formovacích směsí je dnes vyžadována vysoká jakost formy, odlitku, nízká cena a v neposlední řadě splnění ekologických limitů. Tyto parametry společně s univerzálností použití řadí jednotné bentonitové směsi mezi kvalitní formovací materiály. Kvůli konkurenceschopnosti proti jiným pojivovým systémům je však potřeba neustále zlepšovat jejich vlastnosti.

Cílem této diplomové práce bylo ověřit vlastnosti a jiné parametry formovacích směsí ze 4 směsných bentonitů. Jednalo se o 4 odlišné receptury neupřesněného složení. Byla provedena rešerše na téma bentonit – struktura, pojící funkce, důležitost natrifikace, složky bentonitové směsi, degradace složek, oživování novými surovinami a důvody k použití bentonitových směsí. V rámci experimentu bylo provedeno odlití 21 odlitků do každé bentonitové formovací směsi, které byly při každém mísení oživovány přesně stanoveným množstvím nových surovin. V průběhu experimentu byly sledovány parametry směsí, které jsou podrobně zaznamenány a zhodnoceny ve 3. kapitole.

Z naměřených vlastností formovacích směsí vyplývá:

- Vlastnosti směsi se směsným bentonitem A jsou lepší nebo srovnatelné s ostatními směsmi. Problém představuje pouze vysoký obsah (nejvyšší ze všech) nosiče lesklého uhlíku, který je zdrojem ekologicky nežádoucích BTEX látek.
- Směsný bentonit B má ze všech 4 směsí největší sklon k oolitizaci zrn ostríva. Z toho důvodu by mohlo být vyžadováno vyšší dávkování nových surovin a také bude vznikat více odpadu. Obojí znamená finanční přítěž pro slévárnu.
- Nejvyšší obsah degradovaného bentonitu byl nalezen u směsi C. Následkem je vysoká spotřeba vody k dosažení optimální spěchovatelnosti, čímž se zvyšuje riziko slévárenských vad souvisejících s obsahem vody ve formě.
- Formovací směs s bentonitem D se potýká s nižší prodyšností formy ve srovnání s dalšími třemi směsmi. Existuje zde tedy zvýšené riziko plynových vad odlitku.

Pevnostní vlastnosti byly značně zatíženy dvěma problémy. Oběhy na začátku experimentu byly ovlivněny velice nehomogenním ostrívem, které se nacházelo ve vrchní části Big Bagu. Výsledkem byl značný rozptyl naměřených hodnot. Dále již bylo ostrívo v pořádku. Další komplikaci způsoboval použitý typ mísiče, jehož mísení nevytváří směs o vysoké homogenitě. Proto lze pozorovat odchylky průběhu měřených vlastností. I přes tyto komplikace byl získán očekávaný průběh vlastností včetně viditelných rozdílů mezi konkurenčními směsmi.

U směsí B, C, D byl naměřen velmi nízký obsah lesklého uhlíku. V případě výroby složitějšího odlitku, který více tepelně zatíží formovací směs, existuje zvýšené nebezpečí vzniku připečenin.

Na vysokém obsahu vyplavitelných a spalitelných látek má hlavní vinu nepřiměřená míra oživování směsi, což dokazuje rostoucí trend naměřené elektrické vodivosti a aktivního (případně vypočteného) bentonitu.

Měření ulpělé směsi odhalilo problém ve složení směsného bentonitu D, kde došlo k výraznému navýšení množství ulpělé směsi. Vzhledem k neznámu složení směsného bentonitu nelze přesně tvrdit, co tento růst způsobilo. Lze ale konstatovat, že náklady na výrobu odlitku ve směsi D budou vyšší, neboť při tryskání bude ztraceno větší množství směsi než u odlitků litých do ostatních směsí. Nejmenší vrstva ulpívající směsi se vyskytla u odlitku litého do směsi A.

Hodnocení penetrace kovu do formy splnilo očekávání, že kombinace bentonitové formy s obsahem nosiče lesklého uhlíku a grafitické litiny vytváří ve formě takové podmínky, při kterých k penetraci prakticky nedochází. Odlitek nevyvinul tak enormní tepelné zatížení, aby mohlo dojít ke vzniku připečenin. U některých odlitků došlo k místnímu oduhličení, a to maximálně do hloubky 0,5 mm. Povrch odlitků ze všech směsí získal pouze drsný povrch, který odpovídá hrubosti použitého křemenného ostříva.

Termostabilita bentonitů byla posouzena podle stupně znehodnocení bentonitu. Na základě zjištěného množství degradované jílu lze řídit oživování bentonitové formovací směsi. Stanovení bylo provedeno na vratné směsi z konce experimentu, neboť 20 oběhů je minimum, při kterém lze považovat stav směsi za ustálený pro potřeby měření termostability. Při odlévání zkušebního odlitku byl největší stupeň znehodnocení zjištěn u směsi D. Naopak nejméně degradovaného bentonitu obsahovala směs C. Více znehodnocené složky je potřeba doplnit větším množstvím nových surovin, čímž rostou náklady na výrobu. Míra znehodnocení závisí, kromě kvality bentonitu, na hmotnosti a tvaru odlitku.

Po ekologické stránce se bentonitové formovací směsi řadí mezi velmi kvalitní. Komplikaci představuje především přísada nosiče lesklého uhlíku, při jehož zahřátí dochází k vývinu látek ze skupiny BTEX, především benzenu a toluenu. Nejvíce emisí bylo naměřeno na vzorcích z konce experimentu u směsi s bentonitem A, nejméně pak u směsi D, což odpovídá naměřeným obsahům lesklého uhlíku. Vzhledem k tomu, že jde o jediný problém, a navíc se ani nejedná o závratné hodnoty, jsou všechny experimentální směsi po ekologické stránce považovány za vyhovující.

Každý ze zkoušených směsných bentonitů má jiné složení, čímž namísené formovací směsi a následně zapěchované formy získávají odlišné vlastnosti. Technologicky nejlépe vychází směs A, ostatní se potýkají s rozdílnými problémy. O případné vhodnosti směsi pro slévárenské účely rozhoduje každá slévárna dle svých potřeb (sortimentu odlitků). Základním požadavkem by měla být výsledná kvalita odlitku, často je ale bohužel rozhodujícím faktorem cena.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORÁČEK, Milan. *Netrvalé formy*. Brno, 2016.
- [2] HEJL, Matěj. *Pojiva na bázi slévárenských jíílů a jejich vlastnosti*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Karel Rusín.
- [3] CUPÁK, Petr. *Bentonitové formovací směsi*. Brno, 2016. Presentace. VUT FSI Brno.
- [4] JELÍNEK, Petr. Natrifikace montmorillonitických jíílů a jejich funkce v bentonitových směsích. *Slévárenství*. 2010, **57**(5-6), 166-168.
- [5] Clay mineralogy. *Science Education Resource Center* [online]. Montana, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/clay_mineralogy.html
- [6] NEUDERT, Alois. *Formovací směsi s jíílovými pojivy*. b.r. Přednáška. VUT FSI.
- [7] JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi II. část: Pojivové soustavy formovacích směsí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 80-707-8326-5.
- [8] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora* [online]. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2018-04-29]. ISBN 978-80-248-3584-6.
- [9] Formovací nářadí. In: *SlidePlayer* [online]. b.r. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/4126328>
- [10] BEŇO, Jaroslav, Petr JELÍNEK a Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Moulding mixtures* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI_ENG/MMT/Molding%20mixtures.pdf. E-learning. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Metallurgy and Materials Engineering.
- [11] CHAKRABARTI, A.K. *Casting technology and cast alloys*. 1st ed. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2005. ISBN 81-203-2779-9.
- [12] NEUDERT, Alois. *Optimalizace řízení jednotných bentonitových formovacích směsí*. Brno: VUTIUM, 2003. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-2320-X.
- [13] *Bentonitový zpravodaj*. 2010, **14**(1).
- [14] Pyrolýza – princip, historie a současnost. *O energetice* [online]. b.r. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost>
- [15] KWASNIEWSKA, D., M. KRÓLIKOWSKA a M. HOLTZER. Selection criteria of lustrous carbon carriers in the aspect of properties of greensand system. *Metalurgija*. 2013, **52**(1), 62-64.
- [16] PAZDERKA, Jiří. Snižování emisí bentonitových formovacích směsí. *Slévárenství*. 2010, **58**(910), 340-341.
- [17] *Foundry lexicon* [online]. Füssen: Fritsch Media GmbH, b.r. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en>
- [18] TOMEK, Ladislav, Ivo STACHOVANEC a Jana TOMKOVÁ. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků*. Brno, b.r. Studijní syllabus. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [19] LICHÝ, Petr. Vliv teplotních podmínek na kvalitu jednotné bentonitové směsi z pohledu oolitizace křemenných zrn. *Slévárství*. 2003, **51**(4-5), 182-185.
- [20] Oolitisasi pada pasir cetak green sand. *HAPLI* [online]. b.r. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://hapli.wordpress.com/foundry/pasir-cetak/oolitisasi-pada-pasir-cetak-green-sand>
- [21] MIKŠOVSKÝ, František a Petr LICHÝ. The oolitization rate determination of bentonite moulding mixtures. *Archives of Foundry Engineering* [online]. 2008, **8**(2), 103-106 [cit. 2018-05-19]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/421/the-oolitization-rate-determination-of-bentonite-moulding-mixtures.pdf>
- [22] LICHÝ, Petr, Petr JELÍNEK a František MIKŠOVSKÝ. Oolitizace ostríva bentonitových formovacích směsí. *Slévárství*. 2006, **54**(23), 74-79.
- [23] DUDA, Josef. Bentonit - ekologické pojivo slévárenských formovacích směsí. *Slévárství*. 2004, **52**(1), 20-22.
- [24] Green Sand Casting. *Bernier Cast Metals* [online]. Saginaw: Bernier Cast Metals, Inc., b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://bernierinc.com/green-sandcasting/>
- [25] KAREL RUSÍN ... [AJ.], a GRAF. ÚPRAVA VIOLA URBANOVÁ. *Slévárenské formovací materiály: Vysokošk. učeb. pro skupinu stud. oborů stroj. a ostatní kovodělná výroba*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0278-8.
- [26] KUOKAWA, Yutaka, Jun YAOI, Hideaki OTA a Hidekazu MIYAKE. Quantitative Analysis of Oolitics by X-Ray Diffractometer. *Journal of Japan Foundry Engineering Society*. 1991, , 177-182.
- [27] ŠENBERGER, Jaroslav a Antonín ZÁDĚRA. Uhlík v oceli. *Studijní opora předmětu Metalurgie oceli na odlitky* [online]. Brno: VUT, b.r. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_3_6.html
- [28] Spalovací analyzátor s bezúdržbovým provedením. *SPEKTROMETRY.CZ* [online]. Rudice: BAS Rudice s.r.o., 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.spektrometry.cz/analyzatory/g4-icarus-cs-clanek-spalovaci-analyzator.pdf>
- [29] NEJEDLÝ, Zdeněk. *Mechanické a technologické vlastnosti duplexních ocelí v závislosti na hodnotě PREN*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.
- [30] KAŇA, Václav. *Odběr vzorků* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-04-29]. Prezentace. VUT FSI.
- [31] ŠEBESTOVÁ, Hana a Roman KUBÍNEK. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii*. Olomouc, 2012. Studijní text. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [32] STEFANESCU, Doru. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds Part I. *Transactions of the American Foundry Society* [online]. 2001, (109), 1347-1363 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [33] What is BTEX. *Aeroqual* [online]. Auckland: Aeroqual Limited, 2016 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.aeroqual.com/what-is-btex>
- [34] VASKOVÁ, I. a M. HRUBOVČÁKOVÁ. Ecological Binding Material of First Generation. *Archives of Foundry Engineering*. 2014, **14**(2), -. DOI: 10.2478/afe-2014-

0050. ISSN 2299-2944. Dostupné také z:

<http://content.sciendo.com/view/journals/afe/14/2/article-p123.xml>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
BTEX	benzen, toluen, xylen
LC	lesklý uhlík
MM	metylenová modř
PKZ	pevnost v kondenzační zóně
SB	směsný bentonit
SOH	sypná objemová hmotnost

Symbol	Jednotka	Popis
A	[ml]	spotřeba roztoku MM
B	[g]	navážka bentonitu
C	[%]	vlhkost
F	[-]	korekční faktor
G _n	[kg]	hmotnost nových surovin
G ₀	[kg]	hmotnost namísených surovin
H	[mg/g]	hodnota adsorpce mg MM/g vzorku směsi
LC bez korekce	[%]	množství lesklého uhlíku bez korekce
LC s korekcí	[%]	množství lesklého uhlíku s korekcí na MM
MM	[mg MM/g]	sorpce metylenové modře
MM _{bentonitu}	[mg]	adsorpce metylenové modře směsného bentonitu
MM _{směsi}	[mg]	adsorpce metylenové modři směsi
a	[-]	podíl složky ve formovací směsi
ab	[%]	aktivní bentonit
a _n	[-]	podíl složky na oživení
b _v	[%]	vypočtený bentonit
k	[-]	zjištěný koeficient pro daný bentonit
m _s	[g]	hmotnost vysušeného bentonitu
m _w	[g]	hmotnost vlhkého bentonitu
n	[-]	stupeň oživení
Sp	[%]	spěchovatelnost
w	[%]	vlhkost
z _c	[%]	stupeň celkové ztráty složky
σ	[kPa]	vaznost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Struktura montmorillonitu [5]	11
Obr. 2 Bobtnání bentonitu [6]	12
Obr. 3 Bobtnání Na-bentonitu [7]	12
Obr. 4 Test bobtnavosti dle E. Hofmanna [3]	13
Obr. 5 Rozdíl mezi Ca a Na bentonitem [6]	14
Obr. 6 Závislost pevnosti v kondenzační zóně na schopnosti bobtnat [3]	14
Obr. 7 Různé druhy zálupů (vlevo) [8], zálup na odlitku (vpravo) [9]	15
Obr. 8 Funkce lesklého uhlíku [6]	18
Obr. 9 Mikroskopický snímek lesklého uhlíku na povrchu zrn ostřiva [13]	19
Obr. 10 Měření pevnostních vlastností směsi [6]	20
Obr. 11 Závislost vaznosti a prodyšnosti na vlhkosti (vlevo), vaznosti na vlhkosti dle obsahu bentonitu [3]	21
Obr. 12 Doporučené technologické hodnoty bentonitových směsí [3]	23
Obr. 13 Vrstva znehodnocené směsi [6]	24
Obr. 14 Oolitizace - vznik šamotizované obálky [20]	25
Obr. 15 Změna sytné a objemové hmotnosti vlivem oolitizace [7]	26
Obr. 16 Rychlost ustálení směsi podle stupně oživení [12]	27
Obr. 17 Nádoby na skladování formovací směsi a SB.	31
Obr. 18 Kolový míšič Simpson PM bez vrchního víka	32
Obr. 19 Zařízení na kypření směsi (vlevo) a měření spěchovatelnosti (vpravo)	32
Obr. 20 Vaznoměr +GF+ PFP	33
Obr. 21 Stráscací stroj s dolisováním Foramat 20	34
Obr. 22 Sušící váhy KERN DBS (vlevo), měření prodyšnosti od +GF+ (vpravo)	36
Obr. 23 Zařízení pro výrobu válečků pro zkoušky	37
Obr. 24 Přístroj k měření pevností +GF+	37
Obr. 25 Měření pH a el. vodivosti - ultrazvuk (vlevo) a měřicí přístroj inoLab (vpravo) ...	38
Obr. 26 Sušička Mora 524 (vlevo), žíhací pec (vpravo)	39
Obr. 27 Vibrační zařízení k síťovému rozboru	40
Obr. 28 Měření MM - aparát s roztokem modře (vlevo), příklad filtračního papíru s kapkami (vpravo)	42
Obr. 29 Spalovací analyzátor Bruker G4 ICARUS	44
Obr. 30 Modelové zařízení, spodní část vlevo, vrchní vpravo	45
Obr. 31 Indukční pec CONSARC [29]	45
Obr. 32 Kokila pro odběr vzorků (vlevo) [30], spektrometr Q4 TASMAN (vpravo)	46
Obr. 33 Surový odlitek (nahore), přední stěna (uprostřed) a vzorek pro metalografii (dole)	48
Obr. 34 Pásová pila Bomar Ergonomic 320.250 DG	49
Obr. 35 Spodní část odlitku před (nahore) a po tryskání (dole)	50
Obr. 36 Metcon ECOPRESS 100 (vlevo) a jeho produkt (vpravo)	51
Obr. 37 Struers LaboPol-5 (vlevo) a brusné kotouče (vpravo)	52
Obr. 38 Světelný mikroskop MTM 406 s digitálním fotoaparátem Olympus E-510	52
Obr. 39 Vzájemné srovnání směsí dle vlhkosti	57
Obr. 40 Vzájemné srovnání směsí dle prodyšnosti	57
Obr. 41 Vzájemné srovnání směsí dle vaznosti (pevnosti v tlaku)	58
Obr. 42 Vzájemné srovnání směsí dle pevnosti ve štěpu	59
Obr. 43 Vzájemné srovnání směsí dle pevnosti v kondenzační zóně	59
Obr. 44 Vzájemné srovnání směsí dle pH	60

Obr. 45	Vzájemné srovnání směsí dle el. vodivosti	61
Obr. 46	Vzájemné srovnání směsí dle ztráty žháním	61
Obr. 47	Vzájemné srovnání směsí dle obsahu vyplavitelných látek	62
Obr. 48	Porovnání směsí dle průběhu změny sypané objemové hmotnosti monofrakce 0,200 - 0,315 mm	63
Obr. 49	Vzájemné srovnání směsí dle vypočteného bentonitu	64
Obr. 50	Srovnání množství LC (bez korekce na MM) ve formovací směsi	66
Obr. 51	Grafické znázornění míst měření vaznosti formy ve spodku formy	68
Obr. 52	Rozdíly v množství ulpělé formovací směsi	70
Obr. 53	Oběh 19, netryskané, směs A (vlevo nahoře), směs B (vpravo nahoře), směs C (vlevo dole) a směs D (vpravo dole)	71
Obr. 54	Směs D - oběh 1 (vlevo nahoře), oběh 8 (vpravo nahoře), oběh 12 (vlevo dole) a oběh 20 (vpravo dole)	72
Obr. 55	Odlitek litý do směsi A	73
Obr. 56	Odlitek litý do směsi B	74
Obr. 57	Odlitek litý do směsi C	74
Obr. 58	Odlitek litý do směsi D	75
Obr. 59	Oduhličení viditelné na neleptaném vzorku (směs A, oběh 15)	76
Obr. 60	Oduhličení (směs A, oběh 15)	77
Obr. 61	Oduhličení (směs A, oběh 20)	77
Obr. 62	Oduhličení (směs C, oběh 20)	78
Obr. 63	Oduhličení (směs D, oběh 20)	79

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Dávkování surovin pro 1. oběh.....	31
Tab. 2 Dávkování na oživení	31
Tab. 3 Chemické složení kovu.....	46
Tab. 4 Teploty a doby lití.....	47
Tab. 5 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem A	54
Tab. 6 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem B.....	55
Tab. 7 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem C.....	55
Tab. 8 Hodnoty sledovaných parametrů u směsi s bentonitem D	56
Tab. 9 Pevnost směsi po vysušení [kPa].....	60
Tab. 10 Srovnání sypaných objemových hmotností vratu z 21. oběhu.....	63
Tab. 11 Vzájemné srovnání směsí dle adsorpce metylenové modře	65
Tab. 12 Vzájemné srovnání směsí dle množství aktivního bentonitu	65
Tab. 13 Vzájemné srovnání směsí dle obsahu uhlíku.....	65
Tab. 14 Vzájemné srovnání směsí dle obsahu síry	65
Tab. 15 Množství lesklého uhlíku v jednotlivých obězích	66
Tab. 16 Množství LC s korekcí na MM u prvního oběhu	67
Tab. 17 Množství LC s korekcí na MM u posledního oběhu	67
Tab. 18 Střední hodnoty vaznosti naměřené ve vršku formy [N.cm ²]	68
Tab. 19 Množství ulpělé směsi - bentonit A.....	69
Tab. 20 Množství ulpělé směsi - bentonit B	69
Tab. 21 Množství ulpělé směsi - bentonit C	69
Tab. 22 Množství ulpělé směsi - bentonit D.....	70
Tab. 23 Hodnoty pro výpočet stupně znehodnocení bentonitu na konci experientu.....	80
Tab. 24 Stupeň znehodnocení bentonitu na konci experimentu	80
Tab. 25 Překročení ekologických limitů [%].....	81