

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
Katedra strojírenské technologie



**PŘÍSPĚVEK K POZNATKŮM O JAKOSTI VYBRANÝCH
SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ FOREM A VLIVU JEJICH
PARAMETRŮ NA KVALITU ODLITKŮ**

**CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE ABOUT QUALITY OF SELECTED
CASTING MOULDS MATERIALS AND THEIR INFLUENCE ON THE
PARAMETERS OF CASTING QUALITY**

[Habilitační práce]

Abstrakt:

Tato habilitační práce se zabývá shrnutím aktuálních poznatků o charakteristikách a jakosti v praxi běžně používaných slévárenských materiálů, se zaměřením na pískové materiály s ohledem na vlivy, které mohou ovlivnit jejich kvalitu. Dále má práce pomoci odpovědět na otázky, jak může změna kvality slévárenských materiálů ovlivnit kvalitu výsledných výrobků. Tato práce zohledňuje mé pedagogické vlastnosti, které by měly přispět k didakticky kvalitní výuce mých studentů v rámci slévárenských předmětů a celkově přispět k rozvoji slévárenského oboru. Téma práce bylo zvoleno také na základě požadavků průmyslu dle dlouholeté spolupráce naší katedry s různými typy sléváren, především v České republice, a byl vybrán právě na základě zpětné odezvy spolupráce na společných vědecko-výzkumných projektech případně projektech smluvního výzkumu. V této habilitační práci jsou popsány souhrnné poznatky vlivu slévárenských materiálů na výslednou kvalitu odlitků, různé metody hodnocení vlastností slévárenských materiálů a popis vlivu tepelného zatížení na změny technologických a tepelně-fyzikálních vlastností těchto slévárenských materiálů. Další část této práce se věnuje oblasti využití simulačních výpočtů jako nástroje k predikci a eliminaci vad odlitků a dále jako nástroje použitelného k technologickému řízení slévárenské výroby, případně specifických součástí výroby.

Klíčová slova: formovací materiály, jádrové materiály, vlastnosti slévárenských materiálů, simulační výpočty ve slévárenství.

Abstract:

This habilitation work deals with summary of actual findings about characteristics and quality in praxis usually used cast materials, focusing on sand materials considering to influences which may affect their quality. Further the work should help to answer the questions how could the change of cast materials quality affect the quality of final products. This work reflects my pedagogical skills, which should assist to didactic quality education of my students in casting subjects and global assist to development of the foundry branch. The topic of this work was also chosen based on requirements of the industry according to years of cooperation between our department and different types of foundries, at most in Czech Republic, and was chosen directly on the base on feedbacks from the cooperation on common research projects case of contract research projects. In this habilitation work are described comprehensive knowledge about the influence of casting materials on the final quality of castings, different methods of evaluation of the properties of casting materials and the description of the influence of thermal loads on changes of technological and thermal – physical properties of this casting materials. Further part of this work focuses on the utilization of simulation calculations like a tool for prediction and elimination of defects on castings and further like a tool for use to technological management of foundry production, or specific parts of the production.

Key words: forming mixtures, core mixtures, casting materials properties, casting simulations

„Přátelství je součástí lidského štěstí.“ **Jan Werich**

Poděkování

Děkuji své kolegyni paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za cenné rady, podporu a vedení důležitou etapou mého života a za příkladné a inspirativní vedení mojí vědeckou resp. pracovní kariérou. Za cenné rady, věnovaný čas a za připomínky si zaslouží poděkování vedle mé rodiny také mnoho dalších, kteří přispěli k vytvoření této habilitační práce.

Tato habilitační práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci projektu SGS 21122.

OBSAH

OBSAH	4
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	6
1. ÚVOD	8
2. SOUHRNNÉ POZNATKY VLIVU SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ NA VÝSLEDNOU KVALITU ODLITKŮ	22
2.1 CHARAKTERISTIKA FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ [1], [4], [6], [7]	23
2.2 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH SLÉVÁRENSKÝCH POJIV	29
3. VLASTNOSTI SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ A JEJICH ZKOUŠENÍ [90], [92]	38
3.1 MĚŘENÍ PARAMETRŮ JEDNOTNÉ BENTONITOVÉ SMĚSI (JBS)	38
3.2 ZKOUŠKY KE ZJIŠTĚNÍ PEVNOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ [89], [90]	39
3.3 ZKOUŠKY KE ZJIŠTĚNÍ TVRDOSTI [89]	42
3.4 STANOVENÍ VLHKOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ	43
3.5 ZKOUŠKA KE ZJIŠTĚNÍ PRODYŠNOSTI FORMOVACÍCH SMĚSÍ [3], [92]	44
3.6 ZKOUŠKA KE STANOVENÍ MNOŽSTVÍ VYPLAVITELNÝCH LÁTEK	46
3.7 ZKOUŠKA KE ZJIŠTĚNÍ ZRNITOSTI OSTRÍVA SÍTOVÝM ROZBOREM (GRANULOMETRICKÁ SKLADBA OSTRÍVA)	49
4. CHARAKTERISTIKA VLASTNOSTÍ SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ S OHLEDEM NA JEJICH TEPELNÉ ZATÍŽENÍ.	51
4.1 DŮSLEDKY TEPELNÝCH PROCESŮ VE SLÉVÁRENSKÝCH FORMÁCH [1], [2], [4], [12]	51
4.2 TEPELNÉ DILATACE SLÉVÁRENSKÝCH FOREM A JADER	51
4.3 MECHANISMUS VZNIKU A VÝVINU PLYNŮ A PAR V PÍSKOVÝCH FORMÁCH	54
4.3.1 PLYNOTVORNOST FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ	57
4.3.2 ZPŮSOBY VZNIKU PLYNŮ U FORMOVACÍCH A JÁDROVÝCH SMĚSÍ [1]	60
4.3.3 POPIS VZNIKU A PRONIKÁNÍ PLYNU Z FORMY NEBO JÁDRA DO TAVENINY	63
4.3.4 KONDENZAČNÍ ZÓNA PŘI TEPELNÉM OVLIVNĚNÍ SMĚSÍ S VODOU	65
5. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PÍSKOVÝCH A JÁDROVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ	72
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ PLYNOTVORNOSTI	72
5.1.1 METODY MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI PŘÍMÉ – PROVOZNÍ	73
5.1.2 METODY MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI NEPŘÍMÉ - LABORATORNÍ	75

5.1.3	NEPŘÍMÉ EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI A CHARAKTERISTIKA ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PLYNOTVORNOSTI NA KSP TU V LIBERCI	77
5.2	EXPERIMENTÁLNÍ DILATOMETRICKÉ MĚŘENÍ.....	88
5.2.1	CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ DILATACE SLÉVÁRENSKÝCH SMĚSÍ NA KSP TU V LIBERCI.....	88
5.2.2	SLEDOVÁNÍ SOUVISLOSTÍ MEZI PLYNOTVORNOSTÍ A DILATACÍ U VYBRANÝCH SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ	95
5.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ TECHNOLOGICKÝCH A MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POUŽITÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SMĚSÍ	98
6.	CHEMICKÉ REAKCE PROBÍHAJÍCÍ PŘI TEPELNÉM ZATÍŽENÍ NETRVALÝCH PÍSKOVÝCH FOREM	106
6.1	VÝPOČTY CHEMICKÝCH REAKCÍ PLYNŮ V PÍSKOVÝCH FORMÁCH.....	106
6.2	VÝPOČTY ZMĚN GIBBSOVY ENERGIE PRO SLEDOVANÉ CHEMICKÉ REAKCE	108
7.	VYUŽITÍ POČÍTAČOVÝCH SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ JAKO NÁSTROJE K PREDIKCI A ELIMINACI VAD ODLITKŮ	113
7.1	PŘÍPRAVA PODKLADŮ, PARAMETRŮ A TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH VELIČIN POTŘEBNÝCH K SIMULAČNÍMU VÝPOČTU	117
7.2	PŘÍPRAVA A PRŮBĚH SIMULAČNÍHO VÝPOČTU PROCESU LITÍ V PROGRAMU MAGMA 5.....	122
7.3	VYHODNOCENÍ SIMULACE LICÍHO PROCESU V PROGRAMU MAGMA 5	126
7.4	VÝSLEDKY SIMULAČNÍHO VÝPOČTU TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ V PROGRAMU MAGMA 5.....	135
7.5	POROVNÁNÍ VAD ZJIŠTĚNÝCH SIMULAČNÍMI VÝPOČTY A VAD NA REÁLNÝCH ODLITCÍCH.....	139
8.	VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉHO SIMULACE JAKO NÁSTROJE K URČENÍ DEGRADACE BENTONITU	150
8.1	POŠKOZOVÁNÍ BENTONITU V JEDNOTNÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍCH	150
8.2	OŽIVOVÁNÍ JEDNOTNÝCH BENTONITOVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ	151
8.3	VYHODNOCENÍ TEPELNÉ DEGRADACE BENTONITU NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍHO VÝPOČTU	154
9.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	162
10.	ZÁVĚR.....	175
	SEZNAM LITERATURY.....	182
	SEZNAM PŘÍLOH	188

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	součinitel plynovodnosti směsi	$[\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1/2}]$
a	střední teplotní vodivost formy	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
a, b, c, c'	experimentálně stanovené konstanty	[1]
a_F	součinitel teplotní vodivosti vysušené vrstvy formy	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
C	molární tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c	měrná tepelná kapacita (měrné teplo)	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_F	střední měrná tepelná kapacita materiálu formy při teplotním intervalu T _F až T _V ;	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_F	střední měrná tepelná kapacita materiálu formy	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_V	měrná tepelná kapacita vody	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
d_i	průměr částice	[cm]
G	Gibbsova energie	[J]
H	entalpie	[J]
H_F	hloubka prohřátí formy	[m]
K_F	koeficient prohřátí formy	$[\text{m} \cdot \text{s}^{1/2}]$
L_{KR}	latentní krystalizační teplo materiálu odlitku	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
L_V	výparné teplo vody	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
m	hmotnost	[kg]
M	relativní molární hmotnost látky	[g]
m_c	celková hmotnost všech frakcí	[g]
M_{CaCO₃}	molární hmotnost CaCO ₃	$[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$
m_{či}	hmotnost částice	[g]
m_i	hmotnost frakce ostřiva	[g]
n₃	stupeň náhradní křivky pro 3. oblast (n ₃ = 3)	[1]
p	tlak	[Pa]
P_a	atmosférický tlak	[Pa]
P_f	přetlak plynů ve formě	[Pa]
P_m	metalostatický tlak	[Pa]
P_p	odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny	[Pa]
P_{pf}	přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu	[Pa]
q_{TP}	měrné množství vyloučených plynů při teplotě T _p (vztaž. k 1 % pojiva)	$[\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$
r	měrná plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ρ_Φ	hustota formy	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{× Φ}	hustota převlhčené směsi v kondenzační zóně	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
s	procento pojiva ve formovací směsi	[%]

S	plocha styku odlitku a formy	[m ²]
S	Entropie	[J.K ⁻¹]
S_{gi}	povrch 1g frakce	[cm ² · g ⁻¹]
S_{mi}	měrný povrch frakce	[cm ² · g ⁻¹]
T	Teplota	[K]
t	doba ohřevu	[s]
t_p	čas vývinu plynů	[s]
T_F	počáteční teplota formy	[°C, K]
T_P	teplota při které končí vylučování plynné fáze	[°C, K]
T_{PF}	přírůstek reakčního tepla během reakce	[°C, K]
T_V	teplota ohřátého povrchu formy	[°C, K]
T_{PR}	teplota na lici formy	[°C, K]
T_S	teplota, kdy dochází k vylučování plynů ve formě	[°C, K]
T_V	teplota vypařování	[°C, K]
v	objem uvolněných plynů	[cm ³]
V	měrný objem	[m ³ · kg ⁻¹]
V₀	objem soustavy měřicího zařízení	[m ³]
V_m	molový objem plynu	[m ³ · kmol ⁻¹]
w₃	vlhkost ve 3. oblasti pískové formy v místě x (tj. rozhraní 2. a 3. oblasti)	[%]
w_F	výchozí obsah vlhkosti	[%]
w_{KZ}	obsah vody v kondenzační zóně	[%]
Δp	změna tlaku	[Pa]
ΔV	změna objemu	[m ³]
λ_F	součinitel tepelné vodivosti formy	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ξ₀	tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku v časovém okamžiku t.	[mm]
ΔC_p	změna molární tepelné kapacity během reakce	[J.K ⁻¹]
ΔH	změna entalpie	[J]
d₅₀	středního průměr zrna	[mm]
D	prodyšnost formovací směsi	[n.j.p.]
R_{mt}	pevnost formovací směsi v tlaku	[kPa]
φ	Tekutost	[Pa ⁻¹ .s ⁻¹]
t_t	teplota tání	[°C]
JBS	jednotná bentonitová směs	[-]

1. ÚVOD

V dnešní době snad ani nelze nalézt průmyslové odvětví, resp. komplexní výrobek nebo konstrukci kde by nebyl použit odlitek. Slévárenství je klíčovým odvětvím jak světového, tak i našeho průmyslu. Výroba odlitků v České republice byla na přelomu tisíciletí ovlivněna prudkým rozvojem automobilového průmyslu. České odlitky automobilových dílů si úspěšně nacházejí své zákazníky i v zahraničí a napomáhají tak tomu, že se české slévárenství stává skutečně jedním z nejvýznamnějších a nejúspěšnějších odvětví našeho hospodářství a nabývá tak už i evropského významu. Ačkoliv dominantní postavení v objemu výroby na trhu zaujímají slitiny železa (litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, popř. ocel na odlitky apod.), slitiny neželezných kovů (Al, Zn, Cu, apod.) vykazují největší růstový potenciál. Proto je v současné době snaha vyrábět odlitky, které v co největší míře splní zákaznickou požadavku na kvalitu při současném zachování či zvýšení efektivnosti výroby a produktivity práce i s ohledem na ekologickou únosnost.

Ke splnění těchto cílů napomáhá i uplatňování nových slévárenských směsí, které více splňují přísná ekologická kritéria. Protože pojivové systémy těchto směsí bývají dosti často na organickém základě, je nebezpečí většího uvolňování plynů proti pojivům anorganickým. Z tohoto důvodu je nutno neustále zdokonalovat metody jejich analýzy.

Počátky slévárenství ve světovém měřítku spadají do období cca **6 000 let př.n.l.** Předpokládá se, že pro zhotovení odlitků sloužila jako formovací materiál hlína. Základním kovem pro výrobu odlitků byla měď a meteoritické železo. Z dob cca **1300 let př.n.l.** jsou také známy hliněné formy na tzv. ztracený vosk. Obdobu dnešní metody přesného lití na vytavitelný vosk.

Rok **1779** byl velkým milníkem využití litých konstrukčních dílů v souvislosti se stavbou mostu Gorge přes řeku Severn v Anglii v hrabství Shropshire v regionu West Midlands. Jednotlivé součásti tohoto mostu byly odlity v anglickém městečku Coalbrookdale slévačem Abrahamem Darbym. Most je součástí světového dědictví UNESCO a na jeho stavbu bylo použito více než 378 tun litiny. Oficiálně byl otevřen na Nový rok 1781.

V českých zemích nastal významný rozvoj slévárenství v **18. století**, v období průmyslové revoluce, a souvisel s rozvojem textilní výroby. Díky tomuto rozvoji se na českém území objevila spousta nových sléváren např. v roce **1910** – Slévárna a kotlárna

Přerov, **1911** – R.L. Hudlický, slévárna železa Rokycany, 1932 - Komárovské železárný (dnes je tato firma nazvána Buzuluk Komárov, a.s. a je do dnes známá pro výrobu litinových pístních kroužků o různých průměrech, o kterých se zmiňuji v této práci). Dále v roce **1935** vznikla slévárna v koncernu Baťa soustředující se na výrobu obráběcích strojů.

K dalšímu výraznému vývoji dochází až na počátku 20. století. V této době se pro výrobu forem používala především pojiva na základě jílů a pro výrobu jader olejová pojiva. 30. léta minulého století jsou spojena také např. s prvními zmínkami o výrobě forem zmrazováním BEDNÁŘOVÁ [75].

Další vývoj materiálů forem a jader nastává v období 2. světové války a především po válce. Např. patent Croninga z roku **1944**, týkající se pryskyřice a u nás známý patent přihlášený na patentový úřad **12.12. 1947**, kde český autor Lev Petržela využívá pojivo ve formě vodního skla vytvrzeného plynným CO₂, viz přehled v příloze č. 3. Takto tvrzené směsi byly postupně zaváděny do slévárenské výroby. V této době již byla důležitá zdravotní nezávadnost a samozřejmě rychlost procesu, která současně umožňovala výrobu forem a jader bez sušení.

Později se začínají intenzivněji uplatňovat organické pojivové systémy, které přispívají k vysoké produktivitě především výroby jader. Značný vývoj v oblasti uplatnění formovacích a jádrových směsí nastal s rozvojem automobilového a leteckého průmyslu. V současné době je ovšem tento vývoj úzce spojen s otázkami ekologickými a ekonomickými.

Samotný vývoj a použití typů formovacích a jádrových směsí lze dokumentovat pouze na základě vědeckých publikací v odborné literatuře odpovídající doby. Bohužel, u nás to dlouhá léta mohlo být pouze prostřednictvím odborného časopisu Slévárenství nebo ruského časopisu Litějnovo proizvodstvo, později německého časopisu Gießerei. Vybrané publikace plně pokrývaly potřeby doby, možnosti a k tomu odpovídající kvalitu produkovaných odlitků. Vývoj s sebou nenese pouze hledisko ceny, kvality, dostupnosti, ale čím více se blížíme k dnešní době, můžeme sledovat zvyšující se důraz na ekologii, životní prostředí a v neposlední řadě na zdraví zaměstnanců. Šedesátá léta minulého století jsou obdobím širšího použití vazných a polovazných CT směsí. Petržela se začal zabývat zvýšením rozpadavosti klasických CT směsí. Např. první publikace o samotvrdnoucích směsích s vodním sklem (ST směsi, s výraznou exotermickou reakcí, metoda N) jsou z roku **1963**, jak uvádí JELÍNEK [6]. V roce **1964**

byla prezentována výroba jader s použitím hlavně CT směsí, pryskyřičných, olejových, škrobových pojiv, melasy a další speciálních směsí, jak uvádí MACA A SEDLÁK [19]. Dále ROTTER a FOŠUM [20] sledovali vlastnosti vazných formovacích směsí s vodním sklem a bentonitem. V této době se začínala v různých slévárnách uplatňovat chemizace procesu výroby jader a např. v Moravských železárnách začali používat metodu Hot-Box. V této době se také začala používat jádra na bázi reaktoplastů rychle vytvrditelných teplem obchodního značení: Dextroner S7, Glukopren, furanové pryskyřice, fenol- resolové pryskyřice FR 75 a fenol-cukr-resolová pryskyřice, HODAN [21].

K lití velkých a tlustostěnných ocelových odlitků, které se dříve provádělo do sušených šamotových forem, se začalo využívat vazných CT směsí s přísadou určitého množství bentonitu. (85% ostřiva, 5% vodního skla, 10% jílu), jak uvádí HIRSCH, EINERT, FISCHER [22].

V tomto období začíná být také věnována značná pozornost i organickým pojivům. Velký význam byl věnován použití fenolformaldehydové pryskyřice jako pojiva, které se ovšem později ukázalo jako zdravotně nevhodné, až závadné. V těchto letech byly také uveřejněny zkušenosti s výrobou skořepinových forem pro žebrované válce metodou horkých jaderníků [18], bylo upozorňováno na nutnost zhušťování směsí vstřelováním. Jde o metodu výroby tenkostěnných nebo převážně dutých jader (představují skořepinový obal) ze suché, dokonale sypké směsi, která se skládá z křemenného ostřiva, z teplem tavitelné a tvrditelné pryskyřice a popř. dalších přísad. Jako pojivo je použita fenolformaldehydová pryskyřice, jejíž teplota termodestrukce je kolem 900 °C. Tento objev znamenal velký krok ve slévárenství, hlavně svým netradičním přístupem, a to použitím v širším měřítku znalosti chemie při výrobě forem a jader. Vývoj dnešních moderních směsí, jejich zkoušení a inovace jsou založeny především na znalosti chemické podstaty těchto směsí a v nich probíhajících reakcích. S rozvojem formovacích směsí byly také čím dál více uplatňovány kontrolní metody, v 60. letech minulého století byl mimo jiné započat výzkum teplotní roztažnosti formovacích směsí. Firma BCRA pro tyto potřeby vyvinula potřebný přístroj. Teplotní roztažnost materiálů byla sledována hlavně u formovacích směsí používaných pro přesné lití, jak publikuje LEADBETTER a LINDOP [29]. V roce 1966 DVOŘÁK [26] popisuje problematiku výroby jader do kovových jaderníků s použitím technické močoviny při výrobě přesných odlitků.

POZONEV [27] se ve stejném roce zabývá fyzikálně-chemickými vlastnostmi bentonitů. Hlavní pozornost byla věnována sodno-vápenatým bentonitům, které byly vhodné pro výrobu forem. V roce **1968** DOŠKÁŘ a GABRIEL [33] publikovali poznatky o kvalitě samonosné skořepiny na výrobu přesných odlitků. Konkrétně byl sledován vliv obalové hmoty a sušení obalů na pevnost keramických forem. Směs byla připravována z křemenné moučky a kapalného pojiva, zde byl používán etylsilikát 40. Tento materiál je určen pro výrobu forem na vytavitelný model. JELÍNEK [34] publikoval výsledky o rozpadavosti CT směsí, konkrétně rozpadavost směsí vlivem Al_2O_3 . Koncem šedesátých let MACÁŠEK a RUSÍN [36] publikovali poznatky o použití karbamidových směsí pro výrobu slévárenských forem a jader. Karbamidové pryskyřice jsou v podstatě dvousložková syntetická lepidla. Výrobu malých a středních jader a forem je možno provést samovolně, technologií karbamidových směsí, pomocí katalyzátoru, který ovlivňuje polarizaci pryskyřice.

PAULÍČEK a HRIVNAK [35] se zabývali charakteristikou ztekucených formovacích směsí s vodním sklem, které jsou vhodné při výrobě větších forem a jader. Použité suroviny jsou vodní sklo, silikát a křemenné ostřívo. Výsledná směs má nižší zbytkovou pevnost než běžná CT směs.

K roku **1968** jsou datovány první zkušenosti s metodou Cold-Box, která byla vyvinuta ve Spojených státech amerických pod označením Cold-Box Ashland Proces.

Sedmdesátá léta minulého století - i v této době byla značná pozornost věnována opět CT směsím vytvrzeným CO_2 , řešily se některé nedostatky původní metody, především rozpadavost jader. Vedle používaného CO_2 se věnovala pozornost i dalším plynným látkám. Např. zkoušky ukázaly, že profukování CT směsí vzduchem je neúčinné. Vzduch byl používán u speciální vytvrzovací metody Zerasol, která tvoří disperzní soustavu. Vzduch musí mít teplotu asi 300°C . Rozpadavost směsí se blíží rozpadu směsí s organickými pojivy BURIAN a POLÁŠEK [37].

V roce **1972** se u nás objevily publikace uplatňující i statistické metody určené ke kontrole vhodnosti slévárenských směsí. Např. měření prodyšnosti BODEČEK [38] statistická metoda hodnocení granulometrické skladby umělých ostřiv [39], která zavádí kritérium granulometrie logaritmu pravděpodobnosti uspořádání ($\log w$). Dále např. měření roztažnosti a pevnosti skořepin z vybraných žáruvzdorných materiálů pro přesné lití ŠEVČÍK, GABRIEL [40]. Všechny výzkumy prováděné v této době byly za účelem zvýšení kontroly formovacích směsí s následně lepší kvalitou odlitků. V tomto

smyslu bylo prováděno i sledování ovladatelného ztužování jader. Ukázalo se, že dostatečnou rozpadavost jader zajišťují pojivové systémy na základě organických pryskyřic. Za tepla, tj. metoda Hot Box s kyselým katalyzátorem a později fenolické pryskyřice s izokyanáty vytvrzovány triethylaminem [41].

V roce 1973 publikoval JELÍNEK [42] nové použití kritéria zrnitosti log w ke stanovení optimálního poměru dvou a více frakcí při přípravě ostřiv. Studium granulometrické skladby plniva u organických formovacích směsí s výrazně odlišnými technologickými a mechanickými vlastnostmi se zabývali HANAL a RŮŽIČKA [43]. Výrobu jader metodou Hot Box s použitím směsí obsahujících polyvinylalkohol a zvláštní přísady řešil kolektiv autorů ANGELOV, MOKEDONSKI, DOBREM, WOLKOW [46]. Jádra, na jejichž výrobu byly použity furanové pryskyřice, byla vytvrzována speciálními kyselinami.

Značná pozornost byla věnována chrommagnezitovým směsím (CrMg), které se rychle rozšířily do oblasti výroby těžkých odlitků. Pojivem těchto směsí je bentonit. Současně byly používány i směsi CT-CrMg, tj. s vodním sklem a tvrzené CO₂, kde bylo chrommagnezitové ostřivo. Tyto směsi mají vysokou odolnost proti zá lupům.

V tomto roce byly publikovány výsledky studia příčiny a důsledku cristobalitické expanze u směsí s vodním sklem. Teoreticky i experimentálně se autoři pokoušeli vysvětlit cristobalitickou expanzi směsí SiO₂–CT (CO₂). Dále byly studovány obecné zákonitosti destrukcí slévárenských formovacích směsí, a to konkrétně jejich morfologie zrnitých obálek slévárenských pojiv (resp. obálek pojiva) kolem zrn ostřiva a typ jejich destrukce. Byly sledovány obecné zákonitosti mezi ostřivem a pojivem u formovacích směsí [45]. MACA a KRÁLÍK [47] se zabývali otázkami použití samotvrdnoucích slévárenských směsí. Sledovali cementové směsi, směsi na základě furanových pojiv a samovolně tvrdnoucí směsi na bázi vodního skla.

V roce 1974 byly publikovány poznatky o fenolických pojivových systémech pro výrobu směsí vytvrzených ve studených jadernících. Konkrétně byly sledovány mechanismy vytvrzování fenolytických pryskyřic pomocí kyselých vytvrzovadel [48]. V této souvislosti bylo konstatováno, že použití močovinoformaldehydových pryskyřic pro metodu Hot Box je omezeno. V této době byly také publikovány poznatky o pojivu, resp. pryskyřici, která byla známá pod označením Umacol CM (výrobce VCHZ Pardubice), což byla močovinoformaldehydová pryskyřice obsahující 1% volného formaldehydu, VESELÝ [49].

V roce **1975** byla publikována PAVLISKOU [50] výroba chemicky vytvrzovaných jader vyrobených ve studených jadernících na automatické lince. Tato výroba jader byla založena na použití látek Gisanol B (pojivo), Gisanol H (katalyzátor) a Inocar (inhibitor).

V polovině 70. let dochází ke značnému zájmu o technologii výroby zmrazených forem. V odborné literatuře je vznik spojován s Velkou Británií, i když postupně se o tuto výrobu začalo zajímat Japonsko, Německo, Francie i Rusko. Dnes se tento způsob výroby forem označuje metoda EFF-SET a základním médiem pro jejich výrobu je kapalný dusík.

DLAZEK [51] publikoval v roce **1976** výhody samotuhnoucí směsi s organickými pojivy např. furanovými pryskyřicemi nebo s modifikovanými fenolickými pryskyřicemi typu Sinotherm nebo Habrinol. Bylo konstatováno, že fenolické pryskyřice lze použít pro přípravu ST směsí pro výrobu jader pro odlitky z litiny s lupínkovým grafitem, avšak většímu využití ST směsí brání vysoká cena. Ve stejném roce VESELÝ [52] uvedl možnosti využití domácích směsí na bázi organických pojiv. Byl vypracován návrh úpravy močovinoformaldehydových pryskyřic etylenglykosalem.

Od poloviny 50. let minulého století jsme svědky prudkého rozvoje samotuhnoucích směsí se syntetickými pryskyřicemi. Prosazují se směsi s vodním sklem a kapalnými tvrdidly. V roce **1977** KŘÍSTEK a BURIAN [53] publikovali poznatky a vlastnosti samotuhnoucí směsi s vodním sklem a kapalným tvrdidlem Esterol. Stejně duo autorů shrnulo základní vlastnosti koloidních soustav na bázi vodních skel [54].

V druhé polovině 70. let ULRICH a RUMLER [55] publikovali některé speciální metody pro zkoušení formovacích hmot. Jednalo se konkrétně o přípravu zkušebních těles, povrchové vlastnosti ostřiv, zkoušení z hlediska plynových vad. Současně uvádí i význam sledování vlastností za vysokých teplot, jako jsou např. zkoušky dilatačních a mechanických vlastností za vysokých teplot. Uvedli schéma měřicího zařízení pro měření plynotvornosti. Pro laboratorní zkoušení plynotvornosti formovacích a jádrových směsí byl určen přístroj PGD firmy Georg Fischer ze Švýcarska, kde samotná zkouška probíhá v atmosféře inertního plynu.

V roce **1979** prezentovala firma AFS International [56] poznatky o rozkladu pojiv během odlévání do forem a složení jejich exhalací. Tato publikace ukazuje rozkladové produkty a některé výsledné hodnoty. V této době KŘÍSTEK a BURIAN [57]

prezentovali příspěvek o kinetice vytvrzování samotvrdnoucích směsí s vodním sklem a esterovými tvrdidly, resp. o působení esterů na vodní sklo. V tomto období je také věnována další pozornost zkoušení formovacích a jádrových směsí. Švýcarská firma Georg Fischer A.C. [59] popisovala přístrojového vybavení laboratoří a nutnou odbornost personálu pro jeho ovládání.

V této souvislosti je nutno uvést, že švýcarská firma Shaffhausen +GF+ začala již ve 40. letech vyrábět a dodávat zkušební přístroje pro laboratoře formovacích směsí.

Dalším výrobcem zkušebních přístrojů byla americká firma Dietert Co., jejíž výrobní sortiment byl stejný jako +GF+. V socialistických zemích to bylo Maďarsko, které v licenci +GF+ vyrábělo slévárenské vyhodnocovací a zkušební zařízení. Polsko vyrábělo zařízení zase v licenci Dietert Co. Kvalita těchto přístrojů v té době byla velmi dobrá. Svého času vyráběla také některé přístroje Zbrojovka Brno, což bylo v 50. a 60. letech, za doby působení dr. Petržely.

Osmdesátá léta minulého století, v roce 1980 FOŠUM [60] uvádí upřesněné názvosloví v oblasti formovacích látek. Tato publikace objasňuje charakteristiky, jako je formovací směs, co je proces zpevňování, co je pojivová soustava a dále rozdíl mezi organickými a anorganickými pojivy. HORÁČEK, PAVELEK a RUSÍN [65] v této době věnovali pozornost skořepinovým formám a tuhnutí odlitků v těchto formách. V tomto období byla značná pozornost věnována anorganickým pojivům a výrobě přesných odlitků. Byly publikovány poznatky technologie o výrobě přesných odlitků v sádrových formách, zvláštní pozornost je věnována napěněným sádrovým formám, jejich tepelnému zpracování a výrobě odlitků, HOLUBEC [64]. HORÁČEK a kol. [66] publikovali poznatky o aplikaci elektro-fyzikálních metod k identifikaci vytvrzování systému vodní sklo-Esterol. V oblasti organických pojivových systémů byla neustálá snaha o uplatňování zdravotně a ekologicky příznivých pojiv. V důsledku požadavků šetření nákladů na energii došlo také k prudkému vývoji uplatnění metody Cold-Box.

Devadesátá léta minulého století, byl sledován další vývoj metody Cold Box, bylo zjištěno, SCHEREY [77], že se vysoce reaktivní polyuretanová pojiva i přes vysokou okamžitou pevnost vytvrzují pomaleji. Při opakovaném ověřování těchto souvislostí u nově vyvinutých polyuretanových pojiv, vyplynul nový poznatek, že vysoce reaktivní pojiva se ve srovnání s pojivy s nižší reaktivitou, stále ještě vyznačují vysokou okamžitou pevností při současně sníženém dodatečném vytvrzení. Též se ukázalo, že moderní polyuretanová pojiva pro metodu Cold Box mají mimořádně

vysokou rychlost vytvrzování, s minimální spotřebou aminu. V roce **1993** KLOBÁSKA a NOVOTNÝ [61] publikuje o technologii Cold-Box-Amin, která byla použita ve firmě Zetor Brno pro výrobu jader hlav motorů. Nástup organických pojiv, především umělých pryskyřic, do výroby forem a jader vyvolal v průběhu minulého období pokles zájmu o pojivové systémy na bázi vodního skla, avšak zpříšňování norem na ochranu životního prostředí v tomto období, bylo hybnou silou pro aplikaci alkalických křemičitanů nové generace (strukturně upravená vodní skla). V této souvislosti je třeba uvést, že nedostatky původní metody jsou průběžně řešeny od 50. let.

V polovině 90. let se v zahraniční literatuře začaly objevovat první zmínky o novém typu ekologicky nezávadného pojiva pro výrobu jader označované GMBOND[®] (směs vodou ředitelných biopolymerů, tvrzených teplem), které řešilo problémy rozpadavosti jader Hot Box po odlití velmi tenkostěnných odlitků, CUPÁK [70]. V této době byla věnována značná pozornost ekologii a také regeneraci nejrozumnějších formovacích a jádrových směsí, [62]. Konec minulého tisíciletí byl věnován vývoji zdravotně nezávadných a ekologicky příznivých pojiv.

Přelom tisíciletí, pokračoval ve znamení nových pojivových systémů zdravotně nezávadných a ekologicky výhodných. V roce **2003** japonská firma ITOCHU CERATECH CORP. představila převratnou novinku v oblasti ostřív, umělé ostřívo na bázi aluminosilikát-mullit (duté kuličky v široké plejádě zrnitosti), toto ostřívo vykazuje minimální tepelnou dilataci, je známo pod obchodním názvem Cerabead, JELÍNEK [74]. V tomto roce také kolektiv autorů KRAMÁŘOVÁ et al. [63] publikoval poznatky o ekologičtějších biogenních polymerních materiálech, které mohou být použity jako pojivo slévárenských formovacích a jádrových směsí. Výsledkem bylo navržení dvou typů pojiva na bázi proteinových molekul s označením ZMK a ZTK. Proteinové pojivo samotné, je odpadem farmaceutického průmyslu, je netoxické, nehořlavé a nereaktivní. Principem vytvrzování formovacích směsí s navrženými pojivy je pouze iniciace vyvolaná působením tepla. Neprobíhá zde dále žádná chemická reakce.

V současné době se celosvětový trend formovacích a jádrových směsí začal opět vyvíjet ve prospěch anorganických pojivových systémů FOŠUM a ŠEBESTA [73] a to jak z důvodů ekologických, tak i ekonomických. Tyto pojivové systémy zahrnují především metody německých firem, které jsou označovány jako např. AWB, Inotec,

Brach-Box nebo Cardis, které již v roce 2007 charakterizoval JELÍNEK [74]. V této souvislosti konstatoval, že nastoupený trend vývoje jde dvěma směry – přes alkalické silikáty a anorganické soli. Metoda AWB a INOTEC využívá modifikovaná vodní skla. Procesy vytvrzování jsou založeny na dehydrataci alkalických silikátů cestou Warm Box nebo mikrovlnným vytvrzováním. Dosahují vyšší pevnosti proti chemické konverzi (CO_2 proces, estery) a umožňují snížení obsahu pojiva. Skladovatelnost forem a jader je řešena přítomností aditiv, které přispívají i k regulaci pevnosti a dalších aditiv (technologie AWS, CORTIS a INOTEC). U solí (roztoků) je pevnost dosahována hydratačními pochody (Warm Box), ty jsou pomalé a proto jsou směsi před vstřelením do horkého jaderníku někdy přehřívány (Beach Box). Rozpadavost je řešena dehydratací, tj. namáčením komplexů odlitek – jádro.

Pokud jde o výrobu forem, jsou zaváděna nová anorganická pojiva, především v oblasti samotvrdnoucích (ST) směsí. Např. Firma Mazzon uvádí jako svou novinku ST směs na bázi modifikovaného vodního skla, které je uváděno názvem Vertogum 2000 Extra, vytvrditelného speciálními estery. Také před časem přišla s novým anorganickým pojivovým systémem společnost Sand Team. Jde o geopolymerní pojivo na bázi polysialátů (obchodní název Rudal A či Geopol), které je možno vytvrzovat tvrdidly na bázi esterů nebo profukování oxidem uhličitým.

Organické pojivové systémy v této době hned po bentonitových směsích představují jak u nás, tak ve světě, největší objem výroby jader. Výrobci pojiv na bázi syntetických pryskyřic se soustřeďují nejen na technologické zdokonalení pojivového systému, ale především na minimalizaci škodlivin ve výrobním procesu a v deponiích. Např. firma Foseco vyvinula pro metodu Cold Box nový typ pojiva označovaný Politec s nearomatickými rozpouštědly, přísadou Noracel W 100 (proti výronkům) a nový typ CO_2 rezolu Ecolotec u něhož jádra nevyžadují nátěr FOŠUM a ŠEBESTA [73]. Firma Mazzon vyvinula furanovou pryskyřici Ecofur 3100 Extra s nulovým obsahem volného fenolu a formaldehydu a s obsahem dusíku pod 1 %. Prakticky všechny technologické a ekologické trendy vývoje současných organických pojiv v našich podmínkách zabezpečuje firma ASK Chemical Hüttenes – Albertus. V tomto období publikovali JELÍNEK a MIKŠOVSKÝ [68] charakteristiku vyvinutého aditivovaného anorganického pojiva na bázi alkalických silikátů, označované Desil - J, které podstatným způsobem zlepšuje vlastnosti forem a jader, zvláště rozpadavost po odlití.

Pojiva tohoto typu jsou určena pro technologii samotvrdnoucích směsí (směsí – ester, směsí CO_2 - proces).

V tomto období je pro výrobu jader prezentován anorganický pojivový systém pod názvem INOTEC[®] využívající třikomponentní složky: silikátové pojivo (1,8 až 2,5 %), urychlovač reakce (0,1 až 1 %) a v případě nutnosti také speciální ostřívo označované INOMIN[®] (tvoří 1 až 30 %) hmotnosti křemenného ostříva, které je součástí při přípravě směsi s tímto pojivovým systémem, MÜLLER a TEGEL [76].

V tomto období nachází uplatnění především zdravotně nezávadná pojiva, mezi která se řadí tzv. geopolymerní pojiva. Geopolymery jsou předmětem výzkumu posledních deseti let a jsou na anorganické bázi. Pojem geopolymer před třiceti lety poprvé použil profesor Davidovits pro látku, která vzniká anorganickou polykondenzací - geopolymeračí. Geopolymery jsou také alkalické aluminosilikáty (materiály obsahující Si, Al a alkalický prvek Na nebo K). Tyto geopolymery se vyznačují nízkým stupněm polymerace při vysoké rychlosti vytvrzování. V Česku je tento způsob patentován pod č. 297578 a v zahraničí č. 454040 pod označením technologie GEOPOL, která je určena pro výrobu samotvrdnoucích směsí, BURIAN [71]. Také bylo přestaveno geopolymerní pojivo pod označením RUDAL (geopolymer alkalické povahy obsahující SiO_2 a Al_2O_3), které je určeno jak pro přípravu samotvrdnoucích směsí forem a jader a lze ho použít i pro výrobu jader vytvrzovaných CO_2 . Vedle těchto pojiv s ohledem na příznivé ekologické podmínky, dobré mechanické vlastnosti a příznivou rozpadavost, nalézají v oblasti pojiv uplatnění deriváty celulózy, LACHMAN [72].

Pokud se jedná o pojivové systémy na bázi jílu, mají neustále význam i směsné bentonity s vyššími užitnými vlastnostmi a účinnými nosiči lesklého uhlíku. Tyto materiály v českých podmínkách zabezpečuje především firma Keramost a.s.. I v této oblasti byly v zahraničí vyvinuty různé bentonitové směsi, dále jako JBS (jednotné bentonitové směsi), jako např. směs SPEFOL, tj. bezvodá bentonitová směs s velmi jemným křemitým ostřivem, lití probíhá bez sušení a ochranných nátěrů JELÍNEK [74]. Směsi na bázi bentonitu stále představují jak u nás, tak ve světě, největší objem výroby slévárenských forem. Proto je těmto formovacím materiálům věnována pozornost i v této práci se zaměřením na odlitky s velmi tenkou tloušťkou stěn a to produkci pístních kroužků. Současné slévárny využívající tyto JBS, kladou stále více velký důraz na pískové hospodářství a na procesy ožívování formovací směsi. Formovací směs, která přišla bezprostředně do styku s roztaveným kovem, resp. odlitkem, je

dehydratována vlivem teploty odlévané slitiny. Jestliže se takto vysušená směs dostane opět do oběhu, negativně ovlivňuje vlastnosti formovací směsi, především vaznost a prodyšnost. Tím dochází k degradaci bentonitu, resp. celé JBS. Proto je bentonitová směs pravidelně oživována. Z ekonomického hlediska je výhodné nechat obíhat minimální množství jednotné bentonitové směsi, avšak přitom je nutno klást důraz na stabilitu technologických vlastností. Dalším možným důvodem znehodnocení směsi může být poškození ostřiva vlivem tzv. oolitizace. (Při vyšších teplotách dochází k degradaci povrchu zrna křemičitého písku a díky přítomnosti pojiva montmorillonitického typu se na povrchu ostřiva vytváří obálka, na kterou se postupně nabaluje nové pojivo a tím roste tloušťka vrstev pojiva na zrnech křemenného ostřiva.)

Přes pozitivní vlastnosti JBS vykazuje i některé nevýhodné vlastnosti, ke kterým se řadí limitující hodnota pevnosti směsi v tlaku, borcení dutiny formy při zakládání hmotných jader nebo vznik prasklin líce forem při odlévání velkých a hmotných odlitků. V důsledku odlévání do syrových forem mohou nastat na odlitcích zálupy. Nebo se může projevit velké množství uvolněných par v partiích při lici formy, které mohou způsobit vady povrchu odlitku (např. odpařeniny, atd.).

I přes značné množství pojivových systémů, které jsou ve stručné míře výše uvedeny, je třeba konstatovat, že otázka plynotvornosti směsí, jejich tepelná dilatace a další škodlivé vlastnosti jsou neustálým jevem, který se při aplikaci pojiv formovacích a jádrových směsí vyskytuje a má velký vliv na vznik vad odlitků. Proto má značný význam sledování všech těchto vlastností u nově vyvíjených nebo aplikovaných formovacích a jádrových směsí. V tomto smyslu a také ve smyslu ekologického a ekonomického přínosu je také řešena tato habilitační práce.

Habilitační práce byla vypracována podle vysokoškolského zákona 111/1998 Sb., dle paragrafu 72.

V této souvislosti bych chtěl doplnit že k vypracování habilitační práce jsem byl vyzván děkanem Fakulty strojní TU v Liberci, prof. Dr. Ing. Petrem Lenfeldem dne 27.4.2014 při osobním jednání v souvislosti s pozitivním hodnocením mé dosavadní odborné i pedagogické činnosti a dále dne 24.4.2015 při dalším jednání a kontrole činnosti v rámci přípravy habilitačního řízení.

Tato práce tedy zohledňuje mé pedagogické dovednosti, které by měly přispět k didakticky kvalitní výuce mých studentů v rámci slévárenských předmětů a celkově

príspev k rozvoji slévárenského oboru v ČR. Téma práce bylo zvoleno také na základě požadavků průmyslu dle dlouholeté spolupráce naší katedry s různými typy sléváren, především v České republice, a bylo vybráno právě na základě zpětné pozitivní odezvy spolupráce na společných vědecko-výzkumných projektech případně projektech smluvního výzkumu.

Cílem této habilitační práce bylo vytvoření uceleného přehledu poznatků o jakosti vybraných slévárenských materiálů forem a jejich vlivu na kvalitu odlitků.

Habilitační práce bude zaměřena na tyto dílčí cíle:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o vývoji pojivových systémů pro výrobu forem a jader.
2. Provedení rešerše poznatků vlivu slévárenských materiálů na kvalitu odlitků, vlastnosti slévárenských materiálů a možnosti sledování těchto vlastností.
3. Charakteristika vlastností slévárenských materiálů s ohledem na jejich tepelné zatížení.
4. Využití počítačových simulačních výpočtů jako nástroje k predikci a eliminaci vad odlitků.
5. Využití počítačového simulačního výpočtu jako nástroje k technologické optimalizaci slévárenské výroby.

Publikace autora vztahující se k řešení habilitační práce

Patenty v ČR

- [1] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I.: Formovací a jádrová směs pro výrobu hladkých povrchů odlitků, Patent: Číslo přihlášky: 2011-719, přihláška podána 10.11.2011 (probíhající řízení)
- [2] NOVÁ, I., MACHUTA, J.: Zařízení pro měření velikosti plynové vrstvy mezi odlitkem a slévárenskou formou, Patent: Číslo přihlášky: 2012-410, přihláška podána 19.6.2012 (probíhající řízení)

Udělený užitečný vzor, průmyslový vzor v ČR

- [1] MACHUTA, J., NOVÁ, I.,: Zařízení pro měření velikosti plynové vrstvy mezi odlitkem a slévárenskou formou, Užitečný vzor: Číslo dokumentu 25016 (50%, 50%). Zapsáno 7.3.2013
- [2] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I.: Užitečný vzor: Zařízení pro měření plynatosti formovacích a jádrových směsí. Užitečný vzor: Číslo dokumentu 20457. Zapsáno 25.1.2010.
- [3] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I.: Formovací a jádrová směs pro výrobu forem a jader s hladkým povrchem. Užitečný vzor: Číslo dokumentu 24622, (40%, 30%, 30%) . Zapsáno 29.11.2012.
- [4] MACHUTA, J., NOVÁ, I.: Experimentální forma (Experimentální forma pro odlitky deskového charakteru), Česká republika, průmyslový vzor, (zveřejněno 2014,

Číslo zápisu: 36097, číslo přihlášky: 2013-39576, datum zveřejnění: 18.06.2014, (50%/50%)

[5] MACHUTA, J., NOVÁ, I.: Experimentální forma, (Experimentální forma pro odlitky válcového charakteru), Česká republika, průmyslový vzor, (zveřejněno 2014). Číslo zápisu: 36090, číslo přihlášky: 2013-39575, datum zveřejnění: 13.06.2014.

Vysokoškolská učebnice (odborná kniha)

[1] MACHUTA, J. a NOVÁ, I. Fyzikální metalurgie – návody na cvičení, 219 stran, 1. Vyd., Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-197-9. (50%/50%)

[2] MACHUTA, J., NOVÁ, I.: Slévárenské formy, 165 stran., 1. vydání, v rámci projektu Technomat, ISBN 978-80-7494-083-5. (50%/50%)

[3] NOVÁ, I., MACHUTA, J.: Fyzikální metalurgie, 234. stran, 1. vydání, v rámci projektu Technomat, ISBN 978-80-7494-084-2. (50%/50%)

[4] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I.: Castings processings, odborná kniha, Technical university of Liberec, Liberec, 2012, 155 s., jazyk anglický, ISBN 978-80-7372-822-9. (40%, 30%, 30%)

Významné realizované technické dílo

[1] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I. Inovace procesu přípravy formovací směsi. Ověřená technologie, FS - KSP, TU v Liberci, č. KSP-2011-Z/OT-02, aplikace ve firmě UNITHERM, s.r.o, IČO 14868679, Jablonec nad Nisou, 2011.

Článek v impaktovaném časopise zařazený do světově uznávané databáze

[1] MACHUTA, J., NOVÁ I.: Production of the Thickness Castings from Compacted Graphite. In. Metallofizika I Noveishie Tekhnologii, ročník 34, 2012, č.7., s.977-988, Ukrajina, ISSN 1024-1809.

Článek v recenzovaném časopise zařazený do světově uznávané databáze

[1] NOVÁ, I., MACHUTA, J. a HORÁČEK, J. Increasing the Quality of the Production Steering Wheel Castings Using Simulation Calculations of Solidifications. Manufacturing technology. 15. vyd. Ústí nad Labem, Czech Republic: J.E. Purkyně University in Ústí n. Labem, 2015, roč. 4, č. červen. S. 638 – 644. ISSN 1213-2489.

[2] MACHUTA, J. a NOVÁ, I. Simulation Calculation of Solidification and Cooling of Copper Alloys casts. Manufacturing technology. 15. vyd. Ústí nad Labem, Czech Republic: J.E. Purkyně University in Ústí n. Labem, 2015, roč. 15, č. 6. S. 591 – 596. ISSN 1213-2489.

[4] NOVÁ, I., MACHUTA, J.: Monitoring of the structure and quality of aluminium castings in moulds of gypsum mixtures, In: Manufacturing technology 2014 (ISSN 1213-2489). (databáze Scopus).

[5] NOVÁ I.: MACHUTA, J., Monitoring of the microstructure and mechanical properties of the magnesium alloy used for steering wheel manufacturing, In. Manufacturing technology, Vol. 13, 2013, FVTM UJEP Ústí nad Labem, ISSN 1213-2489. , databáze Scopus.

Článek v českém recenzovaném časopise

[1] MACHUTA, J., NOVÁ, I.: Metodika sledování délkové roztažnosti a stanovení součinitele teplotní roztažnosti vybraných slévárenských slitin, odborný článek,

Strojírenská technologie, ICTKI 2012, s. 64-68., Univerzita J.E. Purkyně, FVTM, Ústí nad Labem, ISSN 1211-4162.(50%,50%)

[2] MACHUTA, J.: Sledování dilatačních vlastností slévárenských směsí během tepelné zátěže, odborný článek, Slévárenství, ročník LX, 2012, č.1-2, s. 30-34., ISSN 0037-6825.(100%)

[3] NOVÁ, I.- MACHUTA, J.: Sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí. Slévárenství. LVI, č. 1-2, 2008, s. 43 - 47. ISSN 0037-6825.

[4] MACHUTA, J.: Monitoring of gassiness of the foundry mixtures. Strojírenská technologie - časopis pro vědu, výzkum a výrobu, zvláštní číslo, ročník XII, 2008, s. 149-152. 2008. ISSN 1211-4162, (anglický jazyk)

Příspěvek ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu, sympozia, vědecké konference

[1] PICEK, P., MACHUTA, J. : Praktické použití progresivního způsobu oživování bentonitové formovací směsi novým bentonitem, 18. Ročník bentonitové konference, Sborník přednášek XVIII prezentace výrobků a služeb pro slévárenství, Beroun 2014.

[2] MACHUTA, J.: Linear Thermal Expansivity of the Foundry Moulding and Core Mixtures, JUNIOR EUROMAT 2010, The federation of European materials Societies, Lausanne-Švýcarsko, poster, červenec 2010.

[3] MACHUTA, J.: Foundry mixtures and their linear thermal expansivity, International Scientific conference“ Material Science and Manufacturing Technology – MITECH 2009, 25. -26. června 2009, str. 132-136, Praha, Czech Republic, 2009, ISBN 978-80-213-1931-8, (anglický jazyk).

[4] MACHUTA, J.,: Phase transformation at thermal processing zinc alloys, 11th International conference - Technológia 2009 (Technology 2009), 9.-10. září 2009, sborník příspěvků str. 103 – 106, Bratislava, ISBN 978-80-227-3135-5, (anglický jazyk).

[5] NOVÁ, I. - MACHUTA, J.: Research of gassiness of the foundry samples ith a view to gyps mixtures. In: Transactions of the VŠB – Technical university of Ostrava, č.2, 2009, ročník LII, řada hutnická, článek č. 1503, str. 237-242, ISSN 0474-8484.

Recenzent: prof. Ing. P. Jelínek, CSc.

[6] MACHUTA, J.: Research of thermal linear expansivity of the compact moulding and core mixtures , World Technical Forum 2009 - PhD World Foundry Conference, 1.-3. června 2009, (anglický jazyk).

[7] MACHUTA, J.: Monitoring of gassiness of the foundry mixtures. Sborník příspěvků. 2th International scientific conference, New technology knowledge and information. UJEP Ústí nad Labem, s. 86-87. ISBN 978-80-7044-969-1, 2008 (anglický jazyk).

2. SOUHRNNÉ POZNATKY VLIVU SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ NA VÝSLEDNOU KVALITU ODLITKŮ

Kvalita výsledného odlitku velmi úzce souvisí s kvalitou veškerých použitých materiálů souvisejících s použitou technologií a samozřejmě také s nastavenými technologickými parametry.

Při použití kovových forem, má velký vliv na kvalitu výsledného odlitku, samozřejmě kromě samotné konstrukce formy a vhodného návrhu vtokové soustavy, také teplota formy (předehřev formy) a dále vhodně zvolený separační nástřik na líci formy včetně jeho způsobu aplikace. Pokud pro lití do kovových forem používáme gravitační způsob lití, další parametry z hlediska formy a případných technologických přísad do parametrů ovlivňujících kvalitu výsledného odlitku již nevstupují. Pokud využijeme při lití do kovových forem jedné z technologií vysokotlakého lití rozšíříme tyto kvalitu ovlivňující parametry ještě o vhodně navržený temperační systém a optimální nastavení tlakových a rychlostních poměrů v tlakové komoře licího stroje.

Při použití technologie lití *do pískových resp. netrválých forem* je situace složitější, především díky materiálu samotné formy, tedy většinou polydisperzní (vícesložkové) soustavy a případné nutnosti použití jader a tedy jádrových materiálů.

S touto problematikou samozřejmě souvisí správná lokalizace a predikce potenciálních vad odlitků. Současně velmi důležitou otázkou je predikce příčiny již vzniklých jednotlivých vad a jejich náprava resp. rychlé nápravné opatření, které eliminuje finanční ztráty dané seriové produkce. Tomu dnes napomáhá také využití moderních technologií např. slévárenských simulačních programů a využití elektronových mikroskopů se zabudovanou EDS/EDX analýzou lokálního chemického složení. Výroba odlitků je vždy spojena s výskytem určitého množství odlitků s vadami. Vadou odlitku se rozumí každá odchylka od rozměrů, hmotnosti, vzhledu, makro nebo mikrostruktury nebo vlastností předepsaných příslušnými normami. Vady mohou být zjevné nebo skryté. Zjevná vada je vždy taková, která je vidět pouhým okem. Skryté vady jsou takové, které lze zjistit až po analýze odlitku vhodnými přístroji nebo laboratorními zkouškami. Podle rozsahu a charakteru mohou být vady nepřípustné, přípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Podle ČSN 42 1240 se třídí vady odlitků do sedmi skupin podle vnějších znaků. V rámci těchto skupin se vady třídí podle druhu. Problematika vad je detailněji řešena v kapitole 9. Vady odlitků.

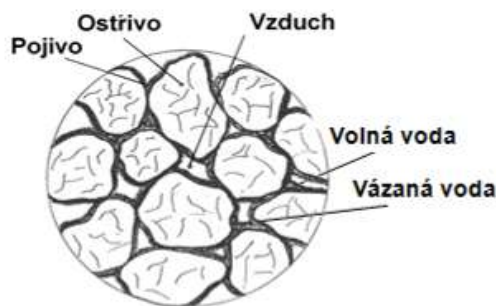
Nebezpečí vzniku defektů je při výrobě odlitků mnohem vyšší než u jiných technologií, protože zde působí řada faktorů, z nichž některé nelze dostatečně ovlivnit a zajistit jejich kvalitativní stálost (jakost surovin, vlhkost ovzduší, složitost odlitků, atd.). S touto problematikou souvisí především fakt, že většina slévárenských procesů probíhá za velmi vysokých teplot a to s sebou nese rizika následných chemických dějů a změn ve fyzikálních vlastnostech všech použitých materiálů a složek. Nehledě na to, že slévárenství je z hlediska teoretického mnohovědní disciplína, která uplatňuje zákony: proudění kapalin, krystalizace slitin s eutektickou přeměnou, nestacionární sdílení tepla a hmoty, pružnosti a pevnosti, atd. Často je velmi složité identifikovat technologické nedostatky výroby, resp. vady odlitků.

Z těchto důvodů má pro slévárnu velký význam odbor řízení jakosti resp. technická kontrola, jejímž úkolem je sledovat nejen kvalitu odlitků, ale také dodržování všech technologických zásad.

2.1 Charakteristika formovacích a jádrových směsí [1], [4], [6], [7]

Formovací a jádrové směsi pro výrobu netrvalých slévárenských forem jsou v podstatě *polydisperzní (mnohorozptýlené)* vícesložkové soustavy, jejichž vlastnosti závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech výchozích složek (mineralogickém a chemickém složení, granulometrické skladbě, povrchovosti částic, povrchové energii, atd.). Současně s těmito vlivy jsou uplatňovány i podmínky přípravy směsi a způsoby jejich dalšího zpracování při výrobě konkrétních forem a jader (zhušťování, popř. vytvrzování, atd.). Jak je obecně známo, formovací a jádrové směsi se skládají ze dvou hlavních složek *ostřiva* a *pojiva*. Ostřivem je žáruvzdorný materiál o velikosti částic nad 0,02 mm, který tvoří nosný objem směsi, resp. skelet forem a jader. Pojivem může být látka nebo směs látek zabezpečující spojení částic ostřiva v kompaktní celek. Dále směs může obsahovat různé *přísady*, tj. látky zlepšující vlastnosti směsi, popř. vlastnosti formy nebo jádra. Nedílnou součástí některých směsí, především na bázi jílových pojiv, je i *voda*, která je plastifikátorem směsi a zabezpečuje její formovatelnost.

Na obr. 2-1 je schéma nejdůležitějších složek formovací směsi, kde pojivo je na bázi jílu.



Obr. 2-1 Schéma formovací směsi, ve které se předpokládá jílové pojivo, [1]

Ostřivo ve formovací směsi je možno charakterizovat jako hrubodisperzní soustavu (částice nad 0,02 mm), avšak např. v případě keramických forem, má ostřivo menší rozměry. Většina ostřiv se nachází v přírodě, jako produkty hornin, nebo ovlivněné činností vody, popř. ledu (především křemenné ostřivo). Naopak některá ostřiva jsou připravena uměle, (např. magnezitové, korundové). Díky tomu, že ostřivo tvoří nosný objem formovací směsi, je jeho důležitou vlastností odolnost proti vysokým teplotám – tzv. žáruvzdornost. Tabulka 2-1 popisuje teploty tání pro různé typy ostřiv.

Tabulka 2-1 Teplota tání různých vybraných druhů ostřiv, [1]

Druh ostřiva	Základní složka	Teplota tavení [°C]
Křemen	SiO ₂	1710
Silimanit	Al ₂ O ₃ .SiO ₂	1810 až 1860
Mullit	3 Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	1810 až 1920
Forsterit	2MgO.SiO ₂	1910
Korund	Al ₂ O ₃	2050
Zirkon	2ZrO ₂ .SiO ₂	2430
Oxid zirkoničitý	ZrO ₂	2700
Šamot	SiO ₂ .Al ₂ O ₃	1670 až 1730
Chramit	Cr ₂ O ₃	1800 až 1900
Magnezit	MgO	2800

Chování ostřiva ve slévárenské formě, především v interakci s roztaveným kovem, je také závislé na jeho chemické povaze. Jak je známo, např. křemenné ostřivo (SiO₂) je kyselého charakteru, mezi neutrální se řadí např. korund, chromit, šamot. Šamot je vhodným ostřivem pro výrobu těžkých ocelových odlitků. Korund je vysoce žáruvzdorný materiál. Hlavním představitelem je magnezit (MgO).

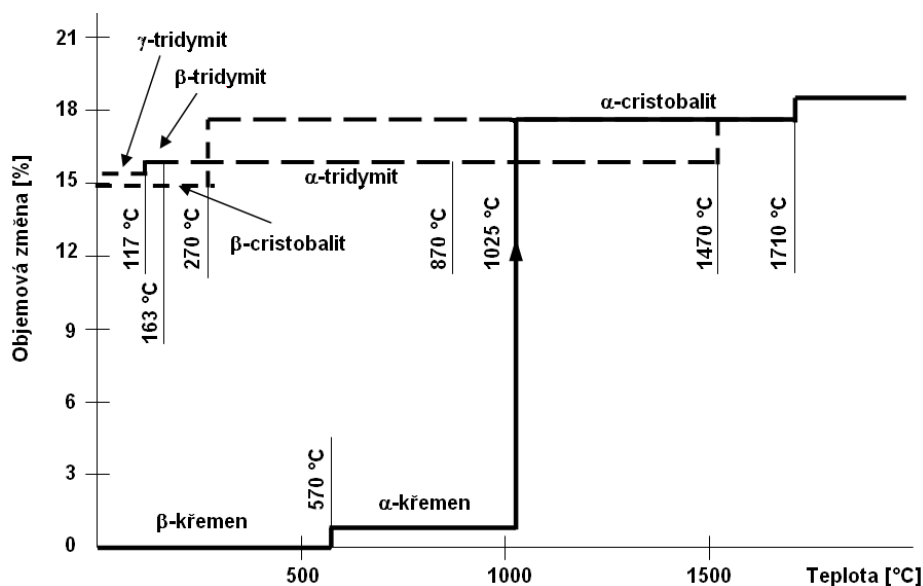
Nevhodně volené ostřivo z hlediska chemické podstaty vůči typu taveniny a jejím schopnostem vytvářet určitou chemickou podstatu oxidu vede k tomu, že nevhodná volba ostřiva může způsobovat povrchové vady odlitků - připečeniny chemického

charakteru (mohou také vznikat připečeniny díky penetraci taveniny mezi zrna ostřiva formy).

Další důležitou vlastností ostřiv jsou jejich dilatační vlastnosti při ohřevu. V této souvislosti je třeba věnovat značnou pozornost křemennému ostřivu. Křemenné ostřivo, resp. oxid křemičitý (SiO_2) - křemen, je nejrozšířenějším minerálem v přírodě, naleziště jsou v různých lokalitách naší republiky (např. Střeleč, Provodín, Srní). Jeho teplota tání je 1710°C . Pro jeho použití na výrobu forem a jader je nutno brát v úvahu, že při ohřevu křemen prodělává polymorfní přeměny, které se projevují objemovými změnami, což může přispívat k porušení celistvosti formy. Křemen může existovat v několika krystalických modifikacích a jedné modifikaci amorfní: α -křemen; β -křemen; α -cristobalit; β -cristobalit; α -tridymit; β -tridymit; křemenné sklo. Základní modifikace křemene, která se nachází v přírodě je β -křemen.

Nejzávažnější důsledky těchto polymorfních přeměn, které nejvíce ovlivňují vlastnosti formovacích směsí, jsou změny objemu a hustoty jednotlivých modifikací. Přeměna β -křemene v α -křemen se projevuje roztažností křemenných zrn při ohřevu povrchových vrstev formy, jejich praskání nebo odlupování. Na obr. 2-2 jsou uvedeny objemové změny při polymorfních přeměnách křemene.

V této souvislosti je nutno upozornit především na nevýhody křemenného ostřiva mezi které se řadí zvýšená reaktivnost za vyšších teplot s oxidy železa a jiných kovů; neplynulá tepelná dilatace - souvisí s malou rozměrovou přesností odlitků a vznikem slévárenských vad (zálupy, výronky); cristobalitická expanze probíhá za přítomnosti mineralizátorů a vysokých teplot nad 900°C a dále silikóza, tedy onemocnění plic z nasycení křemenného prachu.

Obr. 2-2 Objemové změny při polymorfních přeměnách SiO₂, [13]

Vlastnosti formovacích a jádrových směsí jsou také ovlivněny granulometrickou skladbou ostřiva. Disperzita (rozptýlenost) formovací a jádrové hmoty (systému) zahrnuje nejen velikost částí, ale také rozdělení podílů různých velikostí a tvar částic. Nejčastěji jsou formovací a jádrové směsi tvořeny polydisperzním systémem ostřiva o různé velikosti částic. Velikost částic souvisí do jisté míry i s množstvím pojiva ve směsi a tím ovlivňuje i plynotvornost směsi, především v souvislosti s pojivy organického charakteru. Pro slévárenské účely jsou důležitými vlastnostmi ostřiv žáruvzdornost, žárupevnost, chemická podstata a dále velikost a tvar zrn (ostrohranost nebo kulatost). Velikost zrn ostřiva je hodnocena síťovým rozbořem, resp. součtovou křivkou zrnitosti, viz příloha č. 1.

Současně je nutno konstatovat, že částice ostřiva prakticky nevytváří mechanicky stabilní soustavu KALOUSEK a HOLUBEC [1], neboť přitažlivé síly mezi nimi se začínají projevovat až u částic o rozměru menším než 0,001 mm. Proto k pojení ostřiva v kompaktní celek jako je slévárenská forma a jádro musí být použito pojivo.

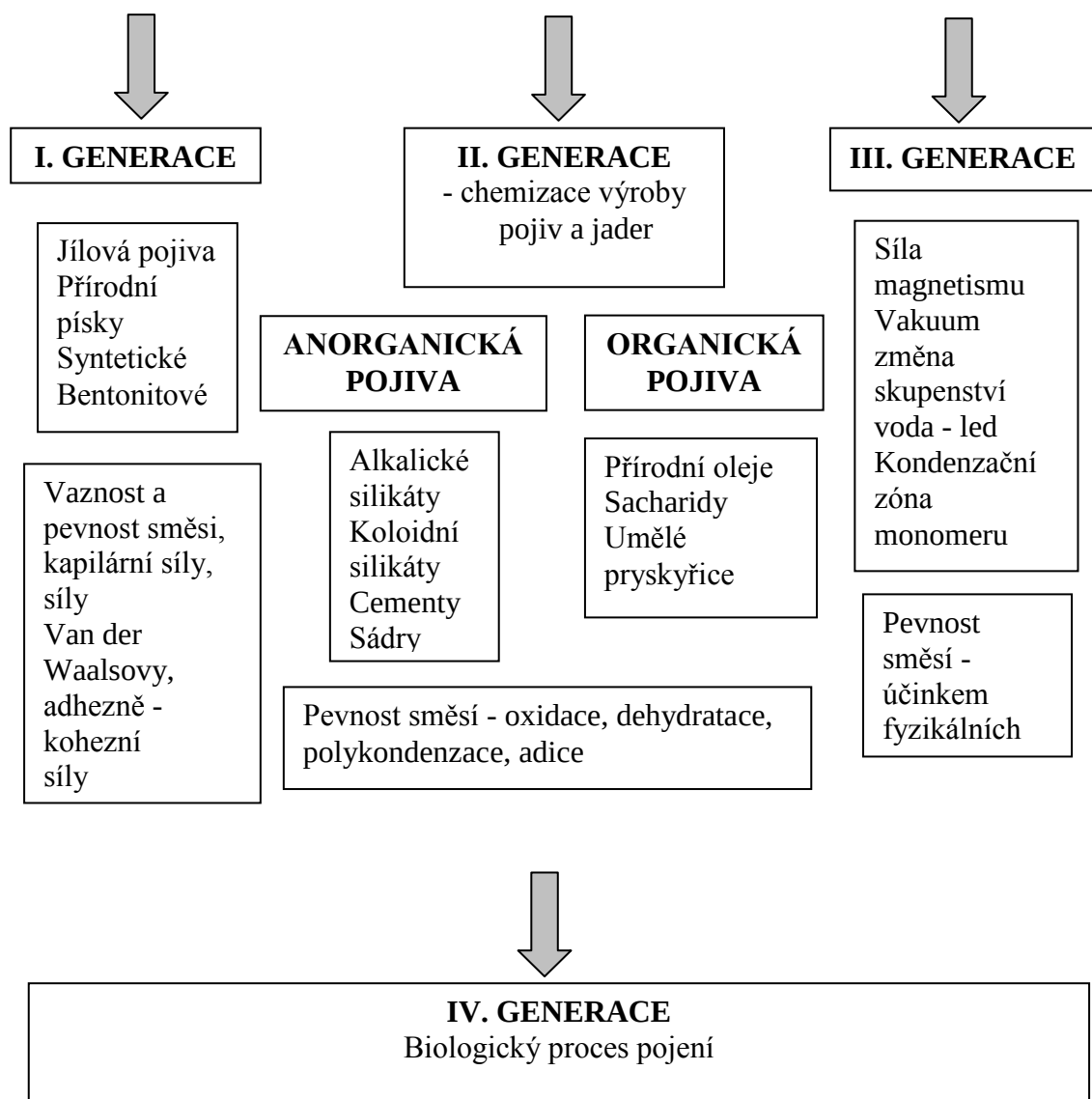
Pojivo je složka formovací nebo jádrové směsi, která vytváří na částici ostřiva souvislou vrstvu (spojenou adhézními silami), jejímž prostřednictvím se částice ostřiva s pojivem dotýkají a vytváří mezi nimi vazby. Pro tento účel pojení musí být pojivo v kašovitém nebo kapalném stavu. Buď je pojivo ve stavu kapalném nebo se do kapalného stavu dostává při jeho zpracování - formováním. V současné době je ve slévárenské praxi používána celá řada pojiv a pojivových systémů, které lze dělit

podle různých kritérií, avšak nejčastější se dělí dle chemické podstaty na anorganická (jíly, sádra, cement, vodní sklo, atd.), jejichž pojící schopnost se uplatňuje v syrovém stavu nebo po chemickém, resp. fyzikálním zpevnění. Další skupinou jsou pojiva organická (umělé pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny a jiné odpadní organické produkty), jejichž pojící schopnost se uplatňuje následkem chemického nebo tepelného zpevnění (ztužení). Z hlediska fyzikální chemie, samotná pojiva tvoří složité soustavy (např. vysokodisperzní nebo koloidní roztoky tzv. soly - jako např. jílová pojiva, vodní sklo, atd). Vlastnosti pojiv ve slévárenské formě nebo v jádře jsou ovlivňovány jejich chemickou postatou, především v součinnosti s roztaveným kovem, což se projevuje jejich významným podílem na fyzikálně chemických dějích a významným způsobem přispívají k plynutvornosti směsi.

Pojící schopnosti soustavy pojivo – ostřivo, jak je výše uvedeno, jsou závislé na velikosti adhezních sil na rozhraní mezi zrnem ostřiva a vrstvou pojiva a velikostí kohezních sil, které jsou závislé na vazebných silách uvnitř daného pojiva. Adhezní síly mezi částicí ostřiva a kapalným pojivem jsou dány mezimolekulárními van der Waalsovými silami, silami vzniklými na základě absorpce molekul pojiva na povrchu tuhé částice, chemickými vazbami v důsledku chemické reakce mezi ostřivem a pojivem a elektrostatickými silami v důsledku vzniku elektrické dvojvrstvy na mezifázovém rozhraní ostřivo – pojivo. Kohezní síly jsou dány silami působícími mezi základními strukturními částicemi (atomy, molekulami, ionty) uvnitř částic pojiva. Pojením se vytváří stav formovací nebo jádrové směsi, čímž je směs schopna odolávat působení vnějších sil.

Vzájemný vztah mezi adhézními a kohézními silami se mění v jednotlivých fázích přípravy a použití směsi.

Nejnovějším způsobem dělíme pojiva do 4 generací, dle mechanismu pojení. 1. generace (kapilární, adhezně-kohezní síly); 2. generace (chemický způsob pojení), 3. generace (pojení působením fyzikálních účinků) a 4. generace (biologický způsob pojení). vždy podle podstaty pojení. Principy pojení u těchto generací jsou vyznačeny na obr. 2-3. U typů pojiv, které se týkají experimentální části této práce, bude princip detailněji popsán. Typy pojiv, které nejsou v této práci měřeny, jsou pro ucelenost práce spolu se svým stručným popisem ovšem doplněny též.



Obr. 2-3 Přehled vývoje pojiv formovacích směsí podle JELÍNKÁ [9]

Pro správnou funkci každého pojiva je potřebné zabezpečit tyto vlastnosti: na počátku působení mají být tekutá, aby se mohla rozmístit na površích a v pórech zrnitého systému; musí smáčet povrch pojeného materiálu (výplně), což vede k vytvoření dobrého adhezního spoje. Po vhodné době se musí pojivo samovolně zpevnit (např. vypařením rozpouštědla, vysušením nebo chemickou reakcí), adhezní spoje musí zůstat pevné i po ztuhnutí pojiva.

Přísady jsou látky ve formovací směsi, které zlepšují vlastnosti slévárenské formy. Např. zvyšují prodyšnost, rozpadavost nebo zvyšují odolnost proti nejrůznějším povrchovým vadám odlitků (např. zapečeninám). Typickou přísadou je např. kamenouhelná moučka (ledek), dále se používají např. dřevěné piliny. Dřevěné

piliny po odlití vyhoří a ve formě vytvoří kanálky, čímž se zvýší prodyšnost a současně se umožní dilatace formy.

Voda se přidává především do směsí jílových nebo sádrových, cementových, atd. Voda v těchto směsích působí jako plastifikátor, tj. dává formovací směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování. Množství vody ve formovací směsi na bázi jílových pojiv bývá kolem 3 až 4 hmot. %, je základem pro formy syrové (nevysušené).

2.2 Charakteristika vybraných slévárenských pojiv

Pojiva 1. generace jsou pojiva anorganická, na bázi jílu. Jílová pojiva jsou stále jedna z nejrozšířenějších slévárenských pojiv. Anorganická pojiva jsou látky nebo směsi, jež mají samovolně schopnost zpevňovat zrnité systémy v kompaktní celek. Používají se při formování na syrovo i na sušení, jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení směsí syntetických i přirozených. Jílové minerály se rozdělují podle složení chemického, krystalografického, geologického aj. Podle struktury patří mezi silikáty vrstevnaté, které jsou složeny z vrstviček čtyřstěnů $(\text{SiO}_4)^{4-}$ a osmistěnů $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ nebo $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$. Jílová pojiva vznikla po primární magnetické krystalizaci zemské kůry, kdy docházelo k hydrotermálním procesům, kdy hydrotermální roztoky pronikaly horninami a reagovaly s nimi. Z těchto roztoků vznikly minerály jako kaolinit, montmorillonit, jílové slídy aj. Magnetické materiály se v procesu větrání rozpadaly a jejich sloučením s těmito roztoky vznikly nové stabilní jílové minerály. Jako např. kaolinitické jíly vznikly rozkladem živců v kyselém prostředí, montmorillonit větráním tufů a sopečného popela v zásaditém prostředí.

Vlivem postupných přeměn a druhotného přemísťování obsahuje jílovina vedle čistých jílových nerostů také zbytky po zvětrání (jemně rozptýlený křemen, živce a slídu), biogenní příměsi (uhličitany vápenatý ze skořápek mikroorganismů a organické součásti z rostlin), nekřemičitany (limonit, hydrargylit) a novotvary vzniklé po usazení jíloviny (pyrit, dolomit aj.). Důležitou složkou jílových pojiv je voda, která se vyskytuje ve více formách (voda vázaná ve formě molekul; voda vázaná ve formě OH skupin; voda volná, je vázána fyzikálně třemi rozdílnými způsoby, voda vázaná na povrch částic, voda vázaná v mezivrstvovém prostoru mimo hydratační obaly vyměnitelných kationtů, voda vázaná v koordinačních sférách vyměnitelných kationtů). Ve slévárenské praxi používáme jíly tohoto typu:

- a) **Kaolinitický** - má poměrně vysokou žáruvzdornost, ale malou bobtnavost. Jeho použití je při výrobě ocelových odlitků. **Kaolinit** - ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), je hlavní součástí horniny kaolinu a žáruvzdorných jíílů. Plavením surového kaolinu se získává plavený kaolin, který obsahuje až 90 % kaolinitu a zbytek jsou příměsi křemene, živce, slídy aj. kaolinitu příbuzné jsou minerály nacrit, dickit a halloysit. Kaolin v surovém stavu je vhodný pro formovací materiály, má vysokou teplotu spékání a je vhodný pro přípravu syntetických směsí na sušení pro odlévání hmotných odlitků z litiny s lupínkovým grafitem a oceli na odlitky. K tomuto účelu je používán žáruvzdorný směsný jííl, který je obchodně nazýván Tumerit K, vyznačuje se vyšší pevností po sušení (cca 1 MPa). Ve slévárnách se však používá ve značné míře kaolinitických jíílů jako pojiva při přípravě dusacích hmot pro opravu kuploven nebo licích pánví. K přednostem směsí patří nízké nebezpečí exogenních bublin, naopak, k nedostatkům patří dlouhý a náročný cyklus sušení, nízká rozměrová pevnost, drahá a náročná povrchová ochrana proti penetraci a špatná rozpadavost.
- b) **Illitický** - má středně velkou žáruvzdornost a bobtnavost. Je hlavním pojivem přírodních směsí. Má nazelenalou barvu. Jsou to slídkové jííly, které jsou obsaženy ve většině přirozených formovacích písků. Hlavní z této skupiny jíílů je glaukonit, který je tvořen drobnými zrnky zelené barvy. Podle barvy i složení je to železato-železitý jííl s 20-25% oxidů železa. Po dokonalém roztření je velmi plastický a formovací směsi s ním dosahují vysokých vazností. Spékavost má kolem 1300 °C, takže vytváří na lici formy tenkou spečenou vrstvičku formovacího materiálu, která se nerozplavuje a snadno se odlupuje z odlitků. Glaukonit je hlavní součástí jíílové zeminy slévárenského přirozeného písku Rájec, který jej obsahuje v množství 12-15%. Někdy obsahuje minerál limonit, který jej zabarvuje do hněda.
- c) **Montmorillonitický** - má nižší žáruvzdornost, ale velkou bobtnavost. Tento typ jíílu má obchodní název Bentonit nebo Sabenil a používá se pro výrobu forem určených k odlévání litinových odlitků. Montmorillonit - $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$ - (hlavní naleziště montmorillonitu je ve Francii) je hlavním minerálem horniny zvané bentonit. Jeho název je podle jednoho jeho naleziště Fort Benton v USA. **Bentonit** vznikl zvětráním sopečných hornin jako čediče, diabasu a hlavně jejich popela, tj. tufů. Přitom proces bentonitizace probíhal především v zásaditých prostředích na rozdíl od kaolinu, jehož přeměna předpokládá kyselé prostředí. Bentonit se od kaolinu liší tím, že je různobarevný (žlutý, šedý, červený) a na omak mastný.

Pro svou dobrou plastičnost a adsorpční schopnosti je hojně využíván např. v chemickém průmyslu, při těžbě nafty, v zemědělství a především tedy i ve slévárenství. Vysoká vaznost bentonitových jílu ve formovacích směsích umožňuje snížit jejich obsah až 3 násobně oproti jiným typům jílu. Díky malému obsahu jílu ve formovací směsi a tedy zároveň nízkému obsahu vody, je možné odlévat formy na syrovo. Přísadami sacharidů do bentonitových směsí docílíme snížení spěchovatelnosti a tím zvýšení odolnosti proti zálupům, zvýšení prodyšnosti, snížení drobivosti a osýchání (hydroskopičnost sacharidů) a např. zvýšení houževnatosti. Dříve používané přísady **dextroner** (matečný louh z výroby glukózy) a **melasa** (matečný louh z výroby sacharózy z cukrové řepy), jsou nahrazeny polysacharidy jako jsou škrob nebo celuloza, spolu se svými deriváty. Z ekologického hlediska jsou jílová pojiva velmi příznivá a ve slévárenství ještě velmi používaná.

Pojiva 2. generace jsou založena na chemické podstatě pojení, buď za tepla nebo za studena:

a) **Pryskyřičná** - jsou určena pro výrobu jader a forem. Jsou to organické látky, vyznačují se poměrně velkou plynotvorností, avšak podporují dobrou rozpadavost směsi. Význam organických pryskyřic ve slévárenství v posledních letech značně roste a jejich rychlý vývoj ukazuje stále nové možnosti uplatnění. Názvem pryskyřice se označují látky, jejichž podstatou jsou makromolekulární částice, které lze zpracovávat teplem, tlakem nebo obojím současně.

Dle jejich chování při zahřívání se dělí na pryskyřice:

- *termoplastické* - jejichž vlastnosti se při zahřívání mění vratně. Působením tepla tyto pryskyřice měknou a při ochlazení opět tvrdnou.
- *termoreaktivní* - které při zahřívání přecházejí nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu.

Základní chemické pochody, při kterých vznikají tyto vysokomolekulární sloučeniny, jsou polymerace a polykondenzace.

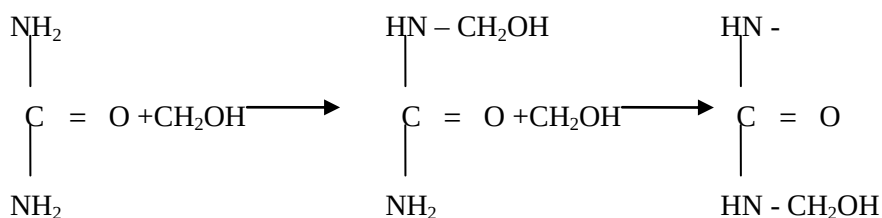
Polymerace je chemická reakce, při které vzniká látka s velkou molekulovou hmotností - polymer, sloučením stejných nebo různých molekul nenasycených nebo cyklických sloučenin (monomerů), bez vylučování vedlejších produktů. Polykondenzace je reakce dvou nebo několika sloučenin, které mají v molekule

nejméně dvě reaktivní skupiny nebo atomy. Polykondenzací vznikají vysokomolekulární látky a vylučují se vedlejší nízkomolekulární produkty. Pryskyřice používané ve slévárenství jako pojiva formovacích a jádrových směsí jsou termoreaktivní, přecházejí tedy nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu polykondenzací.

Dnes se ve slévárenství uplatňuje celá řada pryskyřic, především ty, které nemají karcinogenní účinky. Z tohoto důvodu se již nepoužívají pryskyřice fenolformaldehydové, ale jsou používané pryskyřice *furanové*, *polyuretanové*, *alkydové*, *novolakové*, *resolové*.

V další části je uvedena charakteristika vybraných pojiv II. generace.

- 1) *Fenolformaldehydové pryskyřice* - fenoplasty se vyrábějí polykondenzací fenolu s formaldehydem. V kyselém prostředí s přebytkem fenolu se vytvářejí lineární řetězce makromolekul teplem nevytvrditelných pryskyřic (novolaků). Fenolová jádra jsou mezi sebou spojena metylenovými skupinami CH₂. Reakcí fenolu v alkalickém prostředí za přebytku formaldehydu získáme rozvětvené makromolekuly, jejichž fenolová jádra obsahují volné metylenové skupiny, které jsou podmínkou tvrditelnosti pryskyřice zvané rezol. Dle užití ve slévárenských směsích se dělí na fenolformaldehydové nebo kresolformaldehydové roztoky a práškové fenolformaldehydové tmely - novolaky.
- 2) *Močovinoformaldehydové pryskyřice* - vznikají polykondenzací jedné molekuly formaldehydu ve slabě kyselém prostředí. V první fázi reakce vzniká přechodně nejprve mono a dimethylmočovina nebo směs těchto látek. Na obr. 2-4 je naznačena první fáze vzniku močovinoformaldehydových pryskyřic.



Obr. 2-4 První fáze vzniku močovinoformaldehydových pryskyřic

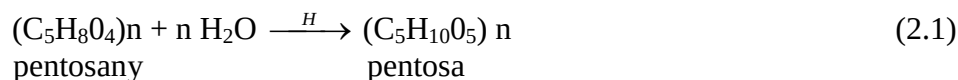
V další fázi reakce vznikají složité deriváty s lineární strukturou, které obsahují metylové skupiny a také sterové a metylenové můstky. Když je

dosaženo požadovaného kondenzačního stupně, reakce se přeruší zavedením alkalického prostředí.

Tyto pryskyřice jsou obvykle ve formě vodního roztoku, příp. se zahušťují nebo v zájmu stability i suší.

- 3) *Furanové pryskyřice* – tato pojiva mají pojmenování od jejich základního heterocyklického uhlovodíku, a to furanu C_4H_4O . Základní surovinou pro přípravu furanových pojiv je jednoduchý derivát furanu – fural $C_5H_4O_2$. Získává se hydrolýzou pentosanů, které jsou obsaženy ve většině rostlinných látek. Hlavní surovinou pro výrobu furalu jsou dřeviny a rostlinné látky, obsahující pentosany obvykle v rozsahu 20 až 40% a vyskytující se v ekonomickém dosahu a množství u výrobního místa. Přeměna pentosanů v surovině na fural probíhá ve dvou reakcích. Hydrolýza pentosanů na pentosy a dehydratace pentos na konečný fural.

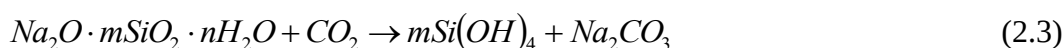
Furanové pryskyřice, které se používají ve slévárenství, jsou kopolymery furfurylalkoholu, močoviny nebo fenolu a formaldehydu. Stechiometrické vyjádření těchto chemických reakcí:



- b) **Olejová** jsou určena pro výrobu jader, pojivový systém je založen na vysušení pojiva při teplotě cca 250 °C.
- c) **Sacharidy** (melasa, škrob, dextrin) jsou určeny pro výrobu jader, zajišťují dobrou pevnost po vysušení.
- d) **Vodní sklo** – je anorganického charakteru, používá se především pro výrobu forem. Pro výrobu jader se téměř nedoporučuje z důvodu velké zbytkové pevnosti. Směsi s vodním sklem se dříve nazývaly chemicky tvrzené. Vodní sklo je ve slévárenství používáno již více než 50 let, zvláště v českých slévárnách sehrává vodní sklo po celou dobu významnou roli jako pojivo pro výrobu forem. Některé nevýhody směsí s vodním sklem vytvrzovaných CO_2 byly hybnou silou vývoje nových, resp. samotvrdnoucích směsí s vodním sklem. Jak je obecně známo, vodní sklo má některé nevýhody (velmi malá vaznost = pevnost za syrova; omezená

skladovatelnost jader; vysoká spotřeba CO₂; nižší pevnost po vytvrzení ve srovnání s organickými pojivy; zhoršená rozpadavost). V současné době se používají formovací směsi s vodním sklem, které lze rozdělit do dvou skupin (směsi s ovládaným ztužováním, tj. profukováním CO₂, označujeme CT směsi, vytvrzování vzduchem, vytvrzování mikrovlnným a infračerveným zářením; směsi bez ovládaného ztužování, což jsou tzv. ST směsi a samotvrdnoucí směsi).

Celý velice složitý proces se může zapsat chemickou rovnicí:



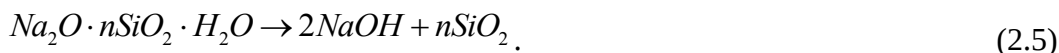
(vodní sklo + oxid uhličitý → gel kyseliny křemičité + soda)

Oxid uhličitý je suchý, kyselý plyn, který vodní sklo vysuší a současně převede do kyselé rosolovité podoby, tím vzniká gel kyseliny křemičité. Gel kyseliny křemičité postupně přechází v kompaktní hmotu, která získává pevnost v tlaku cca 1 MPa. Dalším produktem je uhličitán sodný, tzv. soda. Ta se může při vyšších teplotách rozkládat na plyn Na₂O, který je škodlivý pro možnost naplynění taveniny. Celé používání směsí na bázi vodního skla souvisí s jeho horší rozpadavostí. Proto se v současné době zkouší do vodního skla přidávat různé přísady, které podporují rozpadavost směsí po jejich vytvrzení - tj. snižují zbytkovou pevnost směsí po odlití. Tím byla za uplynulých cca 40 let vyvinuta celá řada dalších variant směsí na bázi vodního skla, jako samotvrdnoucí s práškovými nebo kapalnými tvrdidly - estery.

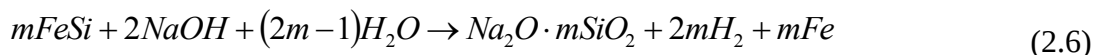
Pojivový systém samotvrdnoucích směsí s vodním sklem (ST - směsi) - jsou to směsi s vodním sklem, kdy je proces vytvrzování založen na jiném principu než je profukování plynem CO₂ a je doprovázen buď exotermickou reakcí nebo bez exotermické reakce. K těmto metodám patří ST směsi vytvrzované práškovými čistými kovy (Al, Zn, atd.) nebo práškovým FeSi nebo CaSi, což je N-metoda (Nishyama - proces). Obě skupiny ST směsí využívají principu rozkladu vody kovem (reakce alkalických roztoků s kovy) za vzniku vodíku a velkého tepelného efektu, který podporuje dehydrataci alkalického křemičitanu. N-proces vychází z velké slučivosti (afinity) kyslíku s křemíkem:



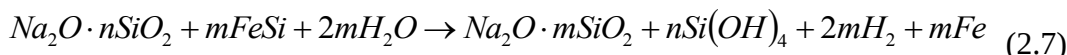
Průběh exotermické reakce je říditelný variací obsahů vodního skla a FeSi ve směsi:



FeSi reaguje s NaOH:



Proces je silně exotermickou reakcí a probíhá tak dlouho, dokud nejsou FeSi a voda spotřebovány:



Celý proces lze zapsat zjednodušeně:



Z hlediska sledování plynatvornosti nevýhodou N - procesu je vznik vodíku, který však se vzduchem tvoří třaskavou směs. Rovněž vysoká teplota směsi působí nepříznivě na laky modelů a jaderníků. Uplatnění našly ST směsi vytvrzované práškovými nebo kapalnými tvrdidly. Nesnadná rozpadavost forem s vodním sklem dala základ pro další způsoby vytvrzování vodního skla.

Vodní sklo může být vytvrzováno esterolem, který obsahuje dvě složky esterů. Jedna složka má nízkou rychlost vytvrzování, druhá vysokou rychlost vytvrzování. Esterol je hnědá až žlutá kapalina, bez zápachu a nemá agresivní účinky. Je netoxická a nehořlavá, v uzavřených nádobách je dlouho skladovatelná. Vytvrzovací proces je založen na dvoustupňové reakci. V prvním stupni dochází v alkoholickém prostředí vodního skla k rozkladu esteru, kdy se uvolňuje kyselina. V druhém stupni dochází vlivem uvolněné kyseliny k želatinaci vodního skla a ke vzniku pojivových gelů kyseliny křemičité. Mechanismus je podobný jako při reakci vodního skla s CO₂. Za výhodu vodního skla s esterolem lze pokládat velmi dobrou rozpadavost vytvrzené směsi.

- e) **Sádrová pojiva** – patří do skupiny hydratačních materiálů, to značí, že základem pojivového systému je reakce sádry a vody. Sádra vzniká částečnou nebo úplnou dehydratací sádrovce CaSO₄ · 2H₂O. Sádrovec se nachází v přírodě, ale je také odpadem z některých chemických výroby. Sádrovec je minerál, který krystalizuje v jednoklonné soustavě, nejčastěji v tabulkách, sloupcích, čočkovitého, zaobleného tvaru. Do teploty 42 °C je stálý, při zvýšení teploty postupně ztrácí vodu. Zahřátím na teplotu 110 °C ztrácí sádrovec krystalicky vázanou vodu a postupně přechází

na nižší formy až na bezvodý síran vápenatý. Při teplotě 1400 °C se sádrovec rozkládá na oxid vápenatý a sírový. Teplota rozkladu se snižuje přítomností oxidu křemičitého až na teplotu 700 °C. Množství krystalické vody, která zbývá po zahřátí sádrovce má vliv na vlastnosti vyrobené sádry. Když se uvolní během zahřívání při teplotě 110 až 130 °C 3/2 krystalické vody, zůstane polohydrát síranu vápenatého, který tvoří hlavní složku každé sádry. Při ztrátě vody při teplotě vyšší než 200 °C začíná postupně vznikat anhydrit, nad 400°C bezvodý anhydrit.

Ve slévárenské praxi rozlišujeme sádro podle mnoha hledisek, např. podle stupně pálení sádrovce, podle doby tuhnutí, podle jemnosti mletí, bělosti, druhu pálení atd. nejčastěji sádro rozdělujeme do 4 skupin (rychletuhnoucí, pomalutuhnoucí, vysokopevnostní, anhydritové pojivo). Důležitá je závislost hodnot pevnosti v tlaku na vodním poměru v/s (množství rozdělovací vody a sádry).

Hlavní děje, které probíhají při tuhnutí a tvrdnutí sádry jsou: rozpouštění polohydrátu, nukleace dihydrátu a růst krystalů dihydrátu. Tyto děje limitují rychlost hydratace a tím i zpevňování, jež postupuje souběžně s hydratací. Na rozdíl od většiny maltovin se tedy tuhnutí sádry zpomaluje s rostoucí teplotou. Tuto anomálii způsobuje to, že se stoupající teplotou silně klesá rozpustnost polohydrátu, zatímco rozpustnost dihydrátu je téměř stejná. Tím se snižuje rozdíl rozpustnosti mezi oběma látkami a snižuje se možnost přesycení.

Při zpracování sádry rozeznáváme pojmy: rychlost míchání, začátek míchání, doba míchání, začátek tuhnutí, konec tuhnutí, doba tuhnutí, doba tvrdnutí a doba odlévání sádrové břečky. Čím je sádra jemnější, tím tuhne rychleji protože se snadněji rozpouští. Čím více sádrovou kaši mícháme, tím rychleji tuhne.

Sádrové směsi mají dnes významné uplatnění ve slévárenství při výrobě forem určených pro přesné lití odlitků ze slitin hliníku, zinku a dalších vhodných kovů.

Pojiva 2. generace, především pryskyřice, se řadí mezi velmi plynotvorná pojiva. Také z ekologického a zdravotního hlediska jsou často méně příznivá. Naopak pojiva na bázi vodního skla bývají převážně méně plynotvorná.

Pojiva 3. generace – je to spíše pojivový systém než samostatné pojivo. Využíváme zde fyzikálních účinků pojení. To je např. formování v magnetickém poli, zmrazování, formování ve vakuu. Tyto metody nejsou v běžné praxi tak rozšířeny, proto nejsou v této práci hlouběji sledovány. Na pojiva této generace totiž nejde z hlediska jejich

rozdílných principů pojení použít běžné zařízení pro sledování jejich slévárenských vlastností.

Pojiva 4. generace – jsou to nejmodernější systémy na principu mikrobiologického pojení. Jejich vývoj stále probíhá, ale ve slévárenské praxi se zatím moc nepoužívají. Vzdávající tendence zpřísňování hygienických podmínek bezpečnosti práce a norem sledujících životní prostředí vede ke zvyšování pozornosti na výzkum těchto pojiv. Jde o materiály vyráběné novými technologiemi za použití materiálů ekologicky nezávadných, přírodních nebo jejich modifikací. U těchto látek se snižuje riziko vzniku toxických látek během jejich tepelného namáhání, jako je tomu u většiny pryskyřičných pojiv. V posledních letech se testují materiály hlavně na bázi sacharidů a bílkovin. Hlavními chemickými prvky těchto pojiv jsou pouze uhlík, vodík, kyslík a dusík.

3. VLASTNOSTI SLÉVÁRENSKÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ A JEJICH ZKOUŠENÍ [90], [92]

Formy i formovací a jádrové směsi musí mít potřebné technologické vlastnosti, aby byla zaručena výroba kvalitních odlitků. Tyto vlastnosti lze dělit podle různých kritérií:

- a) technologické vlastnosti formovacích a jádrových směsí
- b) technologické vlastnosti forem a jader

Podle jiného dělení lze technologické vlastnosti dělit na:

1. Vlastnosti směsí za syrova (v nesusušeném, nebo jinak ovlivněném formovacím a jádrovém materiálu). Ty ovlivňují postup výroby forem a patří mezi ně vaznost, prodyšnost, tvrdost, tekutost, vlhkost a např. drobivost.
2. Vlastnosti směsí po vysušení nebo chemickém zpevnění, což jsou již vlastnosti forem a patří mezi ně pevnost, otěruvzdornost a navlhavost.
3. Vlastnosti směsí během působení vysokých teplot taveniny, které významně ovlivňují konečné vlastnosti odlitku. Jsou to též vlastnosti formy a patří sem pevnost, rozpadavost, plynotvornost, tepelná roztažnost, chemická odolnost a žáruvzdornost.

S rozvojem slévárenství jsou kvůli kvalitě odlitků kladeny zvýšené nároky na vlastnosti slévárenských formovacích směsí a tím rostou i nároky na přesnost a spolehlivost kontrolních metod ke zkoušení směsí, surovin, forem a jader. Předpokládají se dokonalejší a přesnější zkušební metody, komplexnější systém zkoušek. Při výzkumu nových typů surovin, pojivových systémů a dokonalejších směsí je nutno věnovat pozornost i zdokonalení měřicí techniky a přizpůsobit zkoušky a měření novým poznatkům.

Používané zkušební metody jsou většinou normalizovány podle mezinárodních zvyklostí a umožňují srovnávat různé druhy směsí v různých výrobních provozech.

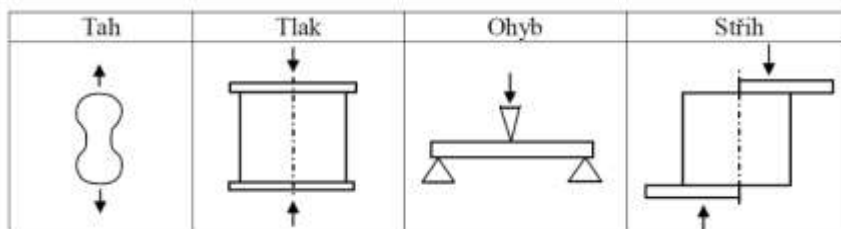
3.1 Měření parametrů jednotné bentonitové směsi (JBS)

Jedním z hlavních předpokladů dobré kvality směsí, forem i odlitků, je spolehlivá kontrola jejich technologických vlastností. Většina sléváren je schopna ve svých pískových laboratořích měřit a zkoušet tři hlavní vlastnosti JBS a to pevnost, prodyšnost a vlhkost směsi. Je výhodné, aby vzorky pro rozbor formovací směsi byly

odebrány přímo u formovacího stroje. Vzorky jsou pak uzavřeny ve vzorkovnici, aby nedocházelo ke ztrátě vlhkosti. Naměřené hodnoty JBS použité v této práci jsou shrnuty v kap. 5.3. Všechny tyto vlastnosti lze vlivem řízené přípravy JBS přímo ve slévárenských provozech optimalizovat a stabilizovat.

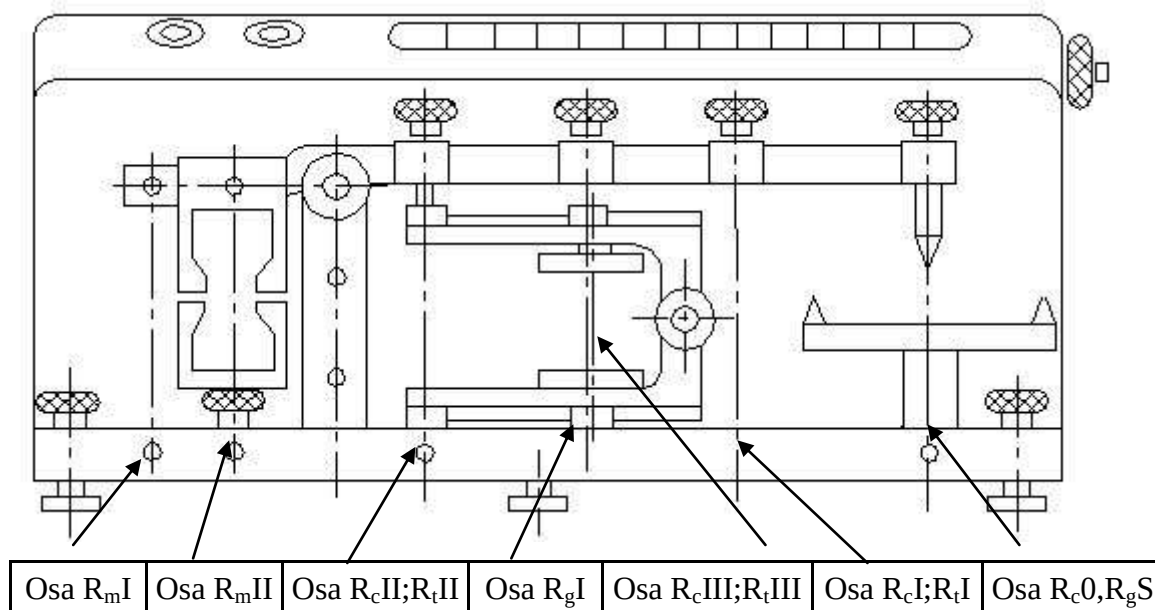
3.2 Zkoušky ke zjištění pevnosti formovacích směsí [89], [90]

Pevnost formovacích směsí je mezní hodnota jejich odolnosti vůči vnějšímu zatížení, při němž dochází k trvalé deformaci nebo zničení vzorku. Stanovuje se pět základních pevnostních hodnot a to: pevnost v tlaku, štěpu, stříhu (smyku), tahu a ohybu. Obr. 3-1 znázorňuje princip zkoušek pevnostních vlastností formovacích směsí.



Obr. 3-1 Znázornění principu zkoušek pevnostních vlastností formovacích směsí [90]

Na pevnost směsí mají vliv faktory jako je tvar a povaha ostřiva, obsah pojiva, stupeň spěchování, vlhkost, proces přípravy, použitá technologie k míchání a teplota. Hodnota pevnosti je také do značné míry závislá na umístění, velikosti a přesnosti kontaktní plochy pojiva a zrn ostřiva. Velký vliv na pevnost směsí má spíše tvar ostřiva než jeho zrnitost. Pojivo svou kvalitou a obsahem ve směsi také ovlivňuje pevnost, stejně jako obsah vody. S rostoucím obsahem vody pevnost nejprve roste až na maximum a po jeho dosažení opět klesá. Zkoušky pevnosti jsou normované normou ČSN 72 1077. Existuje několik standardních druhů přístrojů, které vyrábějí různí výrobci. Pro naše měření používáme Univerzální přístroj LRu – viz Příloha č. 2, který pracuje na principu jednoramenné páky. Tento princip umožňuje použití lineárních stupnic na měřicím válci. Na obr. 3-1 je zobrazen univerzální přístroj LRu s označením příslušných os. Přístroj je vybaven výměnnými čelistmi pro zkoušení všech základních zkoušek pevnosti formovacích směsí. Ke zvolení vhodné polohy čelistí a stupnice na měřicím válci slouží tabulka 3.1, kde jsou uvedeny rozsahy jednotlivých stupnic: je vybrán typ síly, potřebný rozsah, a podle označení rozsahu se zvolí osa, do které je připevněna daná čelist.



Obr. 3-2 Univerzální přístroj LRU s označením os

Tabulka 3-1 Rozsahy stupnic u univerzálního přístroje LRU

Typ síly	Označení rozsahu	Rozsah (Mpa)
Tah	R_{mI}	0-1,3
	R_{mII}	0-2,6
Tlak	R_{c0}	0-0,086
	R_{cI}	0-0,134
	R_{cII}	0-0,67
	R_{cIII}	0-2,1
Ohyb	R_{gI}	0-8,6
	R_{gS}	0-33,6
Střih(smyk)	R_{tI}	0-0,105
	R_{tII}	0-0,525
	R_{tIII}	0-1,56

Při stanovení pevnosti v tlaku se rozlišuje stanovení pevnosti v tlaku za syrova a stanovení pevnosti v tlaku po vysušení. Zkušebním tělískem je váleček normalizovaných rozměrů, jehož průměr i výška je 50 mm s přípustnou tolerancí $\pm 0,3$ mm. Navážené množství směsi se opatrně přesype do jaderníku a spěchová se třemi údery beranu přístroje pro pýchování zkušebních vzorků.

Pevnost v tlaku za syrova, nazývaná také vaznost, je definována jako zatížení, při kterém dojde k porušení zkušební vzorku, vztaženo na jednotku plochy tohoto

vzorku. Obvykle se zjišťuje na zkušebním válečku vytlačeném z pouzdra po stanovení prodyšnosti. Zkušební váleček se vloží mezi paralelní kruhové plochy tlakových čelistí přístroje. Jedna z čelistí se uvede do pohybu tak, aby se tlak na zkušební váleček zvyšoval plynule, rovnoměrně a bez nárazů. V okamžiku porušení válečku přestává tlaková síla působit a na příslušné stupnici přístroje se odečte naměřený tlak. Pevnost v tlaku se udává v kPa, u starších přístrojů je však možné na stupnici odečítat pouze veličinu silovou.

V těchto případech se pevnost v tlaku vypočte podle vzorce:

$$\sigma_{tl} = \frac{F}{S} \text{ [kPa]}, \quad (3.1)$$

kde značí: σ_{tl} - pevnost v tlaku [kPa]; F - maximální sílu, při níž dojde k porušení válečku [kN]; S - příčný průřez zkušebního válečku [m²].

Pevnost v tlaku po vysušení se stanovuje na normalizovaných zkušebních válečkách vysušených při teplotě 200°C až 210°C po dobu 1 hod. Po vychladnutí válečku se provede vlastní zkouška, jejíž průběh je stejný jako při zjišťování pevnosti v tlaku za syrova. Vysušením se pevnost v tlaku zvyšuje. Největší pevnosti v tlaku se dosahuje buď u velmi jemného nebo u velmi hrubého ostřiva. Jemné ostřivo má velký počet dotkových ploch mezi zrny a to zvyšuje pevnost v tlaku, povlak na povrchu ostřiva je však slabý. Hrubé ostřivo má mnohem méně dotkových ploch, avšak při stejném obsahu pojiva jsou zrna obalena silnější vrstvou, to způsobuje kompaktnější systém a to opět zvyšuje pevnost v tlaku. Pevnost směsi závisí také na době míchání ostřiva s pojivem, čím delší doba míchání, tím lepší povlečení zrn pojivem, lepší homogenita a tím vzrůstá i pevnost. Dále se pevnost zvyšuje s vyšším stupněm spěchování.

Při měření pevnosti ve štěpu je postup měření stejný, jako při stanovení pevnosti v tlaku (vaznosti), používají se i stejné tlakové čelisti. Jediným rozdílem je umístění válečku, ten se upevní mezi čelisti, tak aby tlaková síla působila kolmo na osu válečku. Hodnoty při této zkoušce se odečítají na stupnici pro pevnost ve stříhu a vyjadřují se v kPa.

Stanovení pevnosti ve stříhu se určuje podobně jako pevnost v tlaku. Provádí se na stejném stroji, avšak tlakové čelisti se musí vyměnit za čelisti pro stříh. Pro stříh se používají čelisti půlkruhové, které působí jen na protilehlé poloviny ploch základu

zkušebního válečku, je také možné použít speciální čelisti pro dvojité stříh. Pevnost ve stříhu se provádí jak za syrova, tak i po vysušení, a vyjadřuje se v kPa.

Měření pevnosti v tahu a ohybu se definují stejným způsobem jako pevnost v tlaku a stříhu, tedy zatížení [kN], při kterém nastává porušení zkušebního vzorku, vztaženo na kritický průřez a jsou rovněž udávány v kPa.

Při zkoušce na tah mají zkušební tělíska tvar osmičky určených rozměrů. Zhotovují se ve speciálních jadernicích stejným postupem jako válečky pro zkoušky na pevnost v tlaku.

Při zkoušce na ohyb má zkušební tělísko tvar hranolu o délce cca 170 mm. Účinná délka hranolu je 150 mm.

3.3 Zkoušky ke zjištění tvrdosti [89]

Tvrdost je schopnost spěchované směsi odolávat vnikání cizího tělíska. Se zvyšujícími se hodnotami pevnosti formovacích směsí se zvyšuje i tvrdost. Tvrdost se snižuje s velkou vlhkostí a s vyšší jemností zrn. Měření tvrdosti se provádí buď přímo na vyrobených formách, nebo ve zkušebních laboratořích opět na zkušebních válečcích.

Zkouška povrchové tvrdosti je analogií měření tvrdosti kovů podle Brinella. Indikátorem je ocelová kulička, která se vtlačuje do povrchu formy konstantním tlakem, přičemž hloubka vtisku udává na stupnici použitého přístroje tvrdost formy.

Tvrdost má vliv na kvalitu povrchu odlitku. Forma, která je řídce upěchována, tedy měkká forma, je náchylná k zalití pórů kovem a odlitky pak mají horší povrch. Tvrdost formy má být taková, aby pohyb jejich stěn vlivem tlaku tekutého kovu byl minimální.

Pro zjišťování hloubkové tvrdosti se sondou měří odpor spěchované směsi proti vnikání ocelového hrotu při určitém počtu rázů. Odpor reaguje na změny spěchovatelnosti, vaznosti i prodyšnosti. Čím silněji je směs spěchovaná, tím má nižší prodyšnost, vyšší vaznost a klade větší odpor proti vnikání hrotu zkušebního přístroje. Počet rázů odpovídá hodnotě odporu směsi a v provozu pak udává vaznost, spěchovatelnost atd.

3.4 Stanovení vlhkosti formovacích směsí

Podstatou měření vlhkosti je stanovení vysušení vzorku do ustálené hmotnosti a měří se jako % úbytku hmotnosti formovací směsi po vysušení. Výsledek vlhkosti ukazuje obsah volné vody ve směsích a má vliv na jejich prodyšnost, tekutost a pevnostní hodnoty.

Vlhkost lze zjišťovat celou řadou zkušebních metod: *Přímá metoda*, kdy se přímo určuje hmotnost vody, která se zachytí v sušicím prostředí (chlorid vápenatý), tato metoda je zdoluhavá a proto méně často používaná. *Nepřímá metoda*, buď extrakční, kdy se voda převádí do roztoků, jejichž koncentraci a následné zředění kontrolujeme hustoměrem, nebo chemickou reakcí, kdy vzniká plyn, jehož množství je úměrné obsahu vody.

Diferenční metoda, kde se zajišťuje úbytek hmotnosti mezi vlhkou a suchou formovací směsí.

Jedna z nejpoužívanějších je metoda s intenzivním sušením, patřící mezi diferenční metody. Při této metodě všechny druhy zařízení a přístrojů pracují při teplotách vyšších jak 100°C. Nejvíce přístupné a zároveň nejpoužívanější je stanovení vlhkosti pomocí infralampy, které je velmi rychlé. Doba sušení je pro každou lampu jiná, a je stanovena tak, že při prodloužení sušení, nebo při dalším sušení již nedochází k dalšímu poklesu hmotnosti, tedy dosáhne se ustálené hmotnosti. Pro menší navážku vzorku (10-20 g) se obvykle suší 5-15 minut.

Dříve se používali externí váhy s přesností 0,05 g. V dnešní době je již součástí přístroje na měření vlhkosti váha s přesností na setiny gramu, kde se automaticky zobrazí naměřený údaj přímo na displeji, a to dle nastavení buď v jednotkách hmotnosti (pak je nutno vlhkost vypočítat dle vzorce), nebo přímo v procentech vlhkosti.

Výpočet vlhkosti v % se provede dle vzorce:

$$W_p = \frac{m_v - m_s}{m_v} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (3.2)$$

kde značí: W_p – poměrnou (relativní) vlhkost [%]; m_v – hmotnost vlhkého vzorku [g]; m_s – hmotnost vysušeného vzorku [g].

Výslednou hodnotou vlhkosti je aritmetický průměr nejméně ze dvou stanovení. Zkouška je normována normou ČSN 72 1080.

Ke stanovení vlhkosti formovacích směsí sledované v této práci byla použita metoda intenzivního sušení. Sušení vzorku se provádělo na programovatelném elektrickém analyzátoru vlhkosti MAC 50/NH (viz Příloha č. 2) s regulovatelnou teplotou a přesnou váhou. Je to ideální zařízení pro zjišťování relativní vlhkosti a určení suché hmotnosti malých vzorků různých materiálů. Tyto funkce umožňují rychle a přesně stanovit, kolik vody zkoumaný vzorek obsahuje. Zařízení pracuje tak, že nejdříve určí hmotnost vzorku položeného na vážní misce. Poté je vzorek rychle zahříván IR lampou. Během sušení zařízení průběžně kontroluje úbytky hmotnosti a po následném výpočtu zobrazí aktuální hmotnost (vlhkost) na displeji. Ve srovnání s tradičními metodami určování vlhkosti je použití analyzátoru vlhkosti série MAC výrazně zkrácen měřicí čas a zjednodušen proces testování.

Pro vzorek dané bentonitové směsi byla naměřena výsledná hodnota vlhkosti $w_p = 3,12\%$.

3.5 Zkouška ke zjištění prodyšnosti formovacích směsí [3], [92]

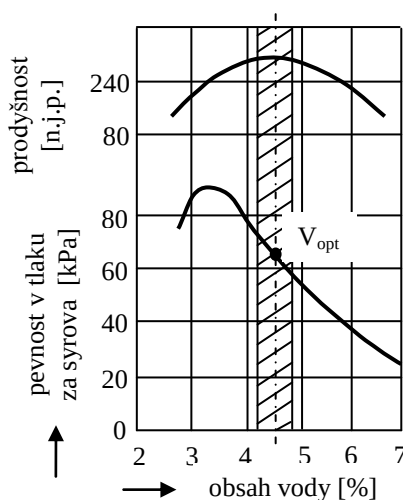
Prodyšnost je schopnost spěchované směsi propouštět plyny a páry. Vyjadřuje se v jednotkách prodyšnosti SI (j. p. SI), tj. počtem kubických centimetrů vzduchu, který se protlačí částí zkušebního tělesa průřezu 1 cm^2 a délky 1 cm při protlaku vzduchu 100 Pa za 1 minutu .

Zjišťuje se na zkušebních válečcích standardních rozměrů (průměr 50 mm a výšce $50 \pm 0,3 \text{ mm}$), které se upěchují pomocí pěchovacího přístroje ze zkoušené směsi. Pěchování válečků se provádí do kovových pouzder, pomocí tří úderů beranidla. Spěchovaný zkušební váleček je ponechán v ocelovém pouzdře, a to se při použití přístroje LP na stanovení prodyšnosti umístí na hlavici přístroje, utěsní se a zapne se přístroj. Vzorkem prochází pod určitým tlakem vzduch a jeho množství, které projde válečkem za určitou dobu udává prodyšnost formovací směsi. Po ustálení manometru se hodnota prodyšnosti odečte přímo na přístroji. Přístroj obsahuje dvě trysky. Větší tryska o průměru $1,5 \text{ mm}$ pro málo prodyšné směsi, menší tryska o průměru $0,5 \text{ mm}$ pro prodyšnější směsi.

Prodyšnost závisí na obsahu pojiva, druhu písku, zrnitosti a vlhkosti. Přidáním většího množství pojiva prodyšnost klesá. Dále klesá s větší upěchovaností směsi, neboť pěchováním dochází k ucpávání pórů, proto se používají raději ostřiva hrubozrnnější a méně se pěchuje. Na prodyšnost má vliv i stejnoměrná velikost zrn ostřiva. Při různé

velikosti zrn ostřiva malá zrna vyplňují mezery mezi většími zrny, ucpávají tak mezery a snižují prodyšnost. Také ostrohranná ostřiva mají při stejné velikosti menší prodyšnost než zrna kulatá. Malá prodyšnost směsi vede k vadám odlitku - bublinám, odvařeninám. Prodyšnost roste s vyšší obsahem vody (volné nebo vázané).

Zkouška prodyšnosti je důležitá pro určení optimální vlhkosti V_{opt} jílových směsí. Optimální vlhkost je různá pro formování na syrovo, nebo po vysušení. Při této vlhkosti je směs nejlépe formovatelná. Formovací směsi s maximální vazností jsou suché a drobné, kdežto směsi s optimálním obsahem vody, u nichž je dosaženo maximální prodyšnosti, jsou nejlépe formovatelné. Na obr. 3-3 je uvedeno stanovení optimální vlhkosti bentonitové směsi na základě její prodyšnosti, v souvislosti s pevností v tlaku za syrova (vaznost) a obsahu vody.



Obr. 3-3 Stanovení optimální vlhkosti bentonitové směsi z její prodyšnosti [92]

Z uvedené závislosti je patrné, že nejvyšší hodnota prodyšnosti odpovídá obsahu vody 4,5% a této vlhkosti, kterou nazýváme V_{opt} odpovídá hodnota vaznosti cca 65 kPa. Rozdíl vlhkosti mezi optimální vazností a vazností maximální není vždy stejný a závisí na druhu a množství jílového pojiva. U bentonitových směsí tento rozdíl činí 0,8 až 1%. Jak je z uvedeného patrné, tak prodyšnost jílových (bentonitových) směsí je do určité míry důležitější než pevnost v tlaku.

Pro stanovení prodyšnosti formovacích směsí v této práci byl použit přístroj LPiLR1 (viz Příloha č. 2) polské výroby. **Přístroj LPiLR1** pro stanovení prodyšnosti umožňuje protlačení 2000 cm^3 vzduchu zkušebním válečkem při použití trysky (dýzy) světlosti 0,5 mm za 270 s a při použití trysky (dýzy) světlosti 1,5 mm za 30 s. Zároveň se dosahuje přetlaková výška vzduchu 1,33 kPa při uzavřeném otvoru. Tlak vzduchu se

vyvíjí ventilátorem a přivádí se pod zkušební váleček. Pokles tlaku se měří prstencovým manometrem, který se vychyluje kolem otočné osy. Otáčivý moment se přenáší pákou na běžec (ručičku), kterým je možno číst hodnotu přímo na stupnici. Výsledkem měření (hodnotou prodyšnosti) na tomto přístroji je tedy přímo výsledná hodnota, popř. tlak ke kterému se v tabulce ČSN 72 1077 nalezne odpovídající hodnota prodyšnosti.

Zkouška se prováděla na zkušebních válečcích standardních rozměrů, průměr i výška $50 \pm 0,3$ mm. Do ocelového pouzdra se nasypalo stanovené množství směsi (množství směsi určeno stejně jako při zkoušce pevnosti) a třemi údery beranidla přechovacího přístroje se vytvořil váleček výšky 50 mm. Spěchovaný zkušební váleček se ponechal v pouzdře a to se vložilo na hlavici přístroje. Pomocí páčky na boku přístroje se pouzdro na hlavici s tryskou utěsnilo a daným tlačítkem se spustil přístroj. Po ustálení ručičky prstencového manometru byla odečtena daná hodnota prodyšnosti. Pro vzorek dané bentonitové směsi byla naměřena **prodyšnost 152,5 j.p. SI** ($\cdot 10^{-8}$ m²/Pa.s). Minimální hodnota prodyšnosti musí být 60 n.j.p.

3.6 Zkouška ke stanovení množství vyplavitelných látek

Obsah vyplavitelných látek, které jsou tvořeny podíly menšími než 0,02 mm, se určí normovaným způsobem (ČSN 72 1078) plavením a sedimentací. Postup stanovení vyplavitených látek je založen na rychlosti sedimentace. Podle Stokesova zákona je rychlost usazování kulových částic v libovolném prostředí vyjádřena vztahem:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 (\rho_1 - \rho_2)}{9 \cdot \eta} \cdot 10^{-2} \cdot g \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \quad (3.3)$$

kde značí: ρ_1 - hustotu částice [kg.m⁻³]; ρ_2 - hustotu prostředí [kg.m⁻³]; η - dynamickou viskozitu prostředí [kg.m⁻¹.s⁻¹]; r - poloměr částice [m]; g - gravitační zrychlení [m.s⁻²].

Vyplavitelné látky jsou důležitým kritériem pro hodnocení písků i směsí. Udávají se v % navážky. Zkouška je vhodná zejména pro bentonitové směsi. Postup zkoušky je následující:

Z formovací směsi, vysušené při teplotě $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, a ochlazené na teplotu místnosti, se naváží vzorek o hmotnosti $50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$. Tento vzorek se nasype do kádinky, přidá se voda a 1% roztok hydroxidu sodného. Vzniklá suspenze se vaří a míchá pomocí speciálního vrtulového míchadla. Vyplavitelné látky, které lpí na

zrnech ostřiva, se rozpojí za varu vody s přísadou hydroxidu sodného a uvolní se vířením vzniklé suspenze. Pak následuje odstátí (usazování), a odsátí vodního roztoku, včetně jemných podílů násoskou. Po odsátí je nutno doplnit kádinku vodou a to do výšky dle tabulky 3-2.(měřeno od spodního okraje sacího otvoru vývěvy). Tento postup se provádí tak dlouho, až voda nad ostřivem zůstává čirá.

Tabulka 3-2 Výška hladiny vody v závislosti na její teplotě

Teplota vody [°C]	14	16	18	20	22	24
Výška hladiny v mm při konstantní usazovací době 5 (10) minut	92,0	97,0	102,2	107,3	112,4	118,5

Po plavení se ostřivo usazené v kádince opatrně přefiltruje, vysuší při teplotě $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Vysušený vzorek se zváží na váhách s přesností $\pm 0,01\text{ g}$ a uschová k dalším zkouškám. Množství vyplavitelných látek se vypočítá ze vzorce:

$$\text{Vyplavitelné látky} = \frac{m_s - m_o}{m_s} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (3.4)$$

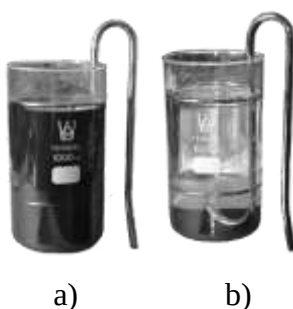
kde značí: m_s - hmotnost vysušeného písku před plavením [g];
 m_o - hmotnost vysušeného ostřiva po plavení [g].

Výsledkem je aritmetický průměr dvou souběžných stanovení. Liší-li se výsledky o více než 20%, u směsi s vaznými jíly o 15%, je nutno zkoušku opakovat.

Pro praktické stanovení množství vyplavitelných látek jsme použili sestavu LSz-2 od firmy Multi-serw z Polska. Dále byla potřeba kalibrovaná skleněná kádinka s vývěvou, jednocentní roztok hydroxidu sodného (NaOH), technické váhy, teploměr a přístroj na sušení směsí Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH.

Navážilo se $50 \pm 0,05\text{ g}$ vzorku vysušeného v sušící peci při teplotě $110 \pm 5\text{ °C}$ a ochlazeného na teplotu místnosti. Navážka se nasypala do kádinky vysokého tvaru, zalila se 250 ml pitné vody a přidalo se 10 ml jednocentního roztoku hydroxidu sodného. Obsah kádinky se přivedl do varu a vařil se 3-4 minuty. Po ochlazení na teplotu místnosti se kádinka vložila na gumovou podložku pod vrtulové míchadlo, které se spustilo do nádoby a přístroj se zapnul. Míchání probíhalo 10 minut, po vypnutí se hlavice zvedla do horní polohy a z míchadla se pomocí stříčky opláchly částčky písku zpět do kádinky. Nádobka se vyjmula z přístroje a doplnila silným proudem vody do výšky 137,4 mm (dle tabulky 3-2) ode dna. Po 10 minutách stání se vývěvou odsála suspenze a to až do poklesu hladiny na výšku 25 mm ode dna (výška sacího otvoru ode

dna). Ke zbytku v kádince se znovu přidalo 10 ml jednoprocentního roztoku hydroxidu sodného a kádinka se opět doplnila silným proudem vody. Po 10 minutách stání se suspenze znovu stáhla vývěvou. Další doplňování vody a stahování vývěvou se opakovalo, jen s tím rozdílem, že už se nepřidával roztok hydroxidu sodného a doba usazování byla 5 minut. Tento postup se opakoval, dokud voda nad ostřivem nebyla čirá (viz obr. 3-4). Poté se odsálo co nejvíce vody a ostřivo usazené v kádince se přefiltrovalo a vysušilo při teplotě 110 ± 5 °C. Vysušený vzorek se zvažil s přesností $\pm 0,01$ g a uschoval k dalším zkouškám.

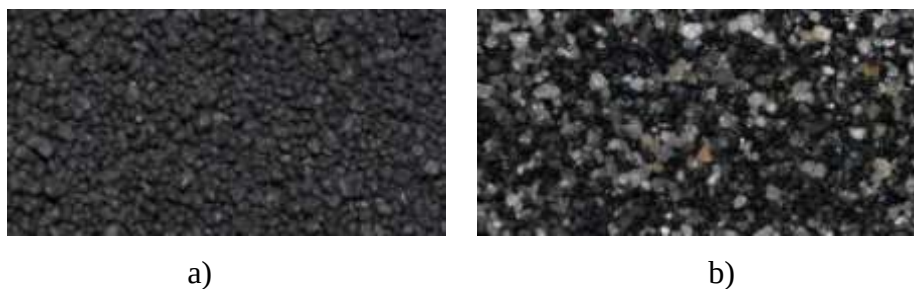


a) kádinka s vývěvou před prvním odsátím suspenze

b) kádinka s vývěvou na konci zkoušky (čirá voda nad usazeným ostřivem)

Obr. 3-4 Kádinka s vývěvou

Množství vyplavitelných látek se vypočítalo ze vzorce pro výpočet vyplavitelných látek. U použitého vzorku bentonitové směsi bylo naměřeno množství vyplavitelných látek 13,76 %.



a) vzorek směsi před zkouškou vyplavitelných látek

b) vzorek směsi po zkoušce vyplavitelných látek

Obr. 3-5 Snímky bentonitové směsi

Obr. 3-5 zobrazuje sledovanou bentonitovou směs před a po zkoušce vyplavitelných látek.

3.7 Zkouška ke zjištění zrnitosti ostřiva sítovým rozborem (granulometrická skladba ostřiva)

Zkouška sítovým rozborem je normována dle ČSN 01 5030 a ČSN 72 1201. Stanovuje zrnitost, neboli granulometrickou skladbu ostřiva, a je graficky popisována tzv. součtovou křivkou. Granulometrická skladba ostřiva a její změny mají často velký vliv na vlastnosti formovacích směsí.

Sítový rozbor následuje až po stanovení množství vyplavitelných látek a je možné ho provádět při splnění těchto podmínek: všechny částice ostřiva musí být dokonale odděleny, nesmí se mechanicky rozrušovat a nesmí navlhčovat, aby nedocházelo k ucpávání sít. Ostřivo je na speciálním zařízení proséváno sadou sít. Odstupňování sít je stanoveno podle matematické závislosti, k rozboru formovacích směsí se nejčastěji používá kontrolní soustava sít dle ČSN 1210 s průměry ok 1,5; 1,0; 0,6; 0,3; 0,2; 0,1; 0,06 mm. Na síto s největším okem se nasype navážka ostřiva a nechá se prosévat tak dlouho, až je další propad zanedbatelný (cca 10 minut). Po prosetí se sledují podíly ostřiva zachycené na jednotlivých sítích. Poměrné obsahy jednotlivých podílů ostřiva se vypočítají ze vzorce:

$$\text{Podíl ostřiva na sítu} = \frac{m_p}{m_s} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (3.5)$$

kde značí: m_p - hmotnost podílu ostřiva na sítu [g];

m_s - hmotnost vysušeného ostřiva naváženého před plavením [g].

Výsledkem zrnitostního rozboru je aritmetický průměr dvou souběžných stanovení, pokud je rozdíl mezi nimi 20% , nebo větší, je nutno zkoušku opakovat.

Zrnitost písku se vyjadřuje buď tabulkou, v níž se uvedou množství jednotlivých frakcí, včetně vyplavitelných látek v %, nebo graficky diagramem zrnitosti ostřiva (součtovou křivkou) v semilogaritmickém rastru. Součtová křivka je vidět v příloze č. 1. Na svislou osu se nanáší procenta ostřiva zachyceného na jednotlivých sítích, vztažená k původní navážce. Na vodorovnou osu, která má logaritmickou stupnici, se vynáší průměr ok sít [mm], na kterých se zachytila příslušná množství ostřiva.

Průsečík součtové křivky s přímkou, označující kritickou velikost částic ostřiva 0,02 mm, je bod vyznačující 100% ostřiva. Na úsečce, která vyjadřuje 100% ostřiva se vyznačí 25%, 50% a 75% , k těmto hodnotám se podle součtové křivky přidají odpovídající velikosti zrna, jež označujeme d_{25} , d_{50} , d_{75} . d_{50} je velikost středního zrna

a je to myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 50% daného ostřiva. d_{25} je myšlená velikost ok síta, na kterém by se zachytilo 25% daného ostřiva. d_{75} je myšlená velikost ok síta na kterém by se zachytilo 75% daného ostřiva viz příloha č.1.

Ze součtové křivky se hodnotí již zmíněná velikost středního zrna (d_{50}). Dále pak stupeň stejnorodosti ($s = d_{75} / d_{25}$), neboli pravidelnost zrnitosti. Čím je hodnota $s = d_{75} / d_{25}$ bližší 1, tím jsou zrna ostřiva stejnoměrnější a součtová křivka je strmější. S klesající hodnotou je součtová křivka plošší a zrna ostřiva jsou velikostně různorodá.

Charakter a tvar zrn ostřiva má velký vliv na technologické vlastnosti formovacích směsí. Ostřiva kulatá jsou lépe spěchovatelná a tím má formovací směs větší tekutost, ale zároveň větší náchylnost na vznik vad odlitku - zálupů. Proto je pro syntetické bentonitové směsi vhodnější ostřivo poloostrohranné, se sníženou možností spěchování. U jádrových směsí je tomu naopak. Kulatá zrna ostřiva s hladkým povrchem se lépe povlékají vrstvou pojiva, ve spěchované směsi vytvářejí více kontaktních míst, a směs dosahuje vyšší pevnosti po vysušení, než formovací směs s ostrohranným ostřivem.

4. CHARAKTERISTIKA VLASTNOSTÍ SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ S OHLEDEM NA JEJICH TEPELNÉ ZATÍŽENÍ.

4.1 Důsledky tepelných procesů ve slévárenských formách [1], [2], [4], [12]

Vlivem tepla, které slévárenská forma přebírá z tuhnoucího odlitku, dochází u netrvalých forem a jader především k tepelnému vývinu plynů v důsledku rozkladu látek, chemických sloučenin a vzniku vodní páry. Současně dochází k vlivu tepelného namáhání formy a dále k dilatačním změnám lineárních rozměrů formy a popř. jádra. Všechny tyto nepříjemné vlivy je nutné sledovat. Nejčastěji se tak děje na laboratorních vzorcích specifických rozměrů nebo hmotnosti. Z důvodů nepříjemných vlivů tepelných procesů je tedy sledována např. plynotvornost slévárenských směsí nebo jejich tepelná dilatace a pracuje se na vývoji zařízení pro tato měření. Současně se připravují lepší technologické postupy přípravy vzorků a následně postupy jejich vyhodnocení. Dilatační změny je možno sledovat pouze tehdy, je-li z formovací nebo jádrové směsi připraven kompaktní vzorek. Kompaktnost vzorku však není nutnou podmínkou pro sledování plynotvornosti u těchto směsí.

4.2 Tepelné dilatace slévárenských forem a jader

Formovací a jádrové směsi v kompaktním stavu představují pevnou látku, u které lze sledovat tepelnou, resp. teplotní roztažnost. Tyto, svou podstatou pevné látky, jsou složeny z částic s téměř pravidelným uspořádáním. Rozměrové změny různých látek jsou, mimo jiné, závislé na jejich vnitřní struktuře a na povaze sil mezi jejich vnitřními částicemi. Mezi vnitřními částicemi látek působí přitažlivé a odpuzivé síly. Těmito silami je dána soudržnost pevných a kapalných látek. Střední vzdálenost mezi částicemi pevných látek je kolem 0,25 nm. Vzájemné působení přitažlivých sil mezi částicemi způsobuje, že pevná látka vytváří těleso určitého tvaru a objemu. Nepůsobí-li na těleso vnější síly a nemění-li se teplota tělesa, zůstává tvar i objem pevného tělesa stejný.

Objemové změny tělesa způsobené zvýšením teploty při konstantním tlaku se vyjadřují označením pravá objemová roztažnost, kterou lze vypočítat podle vztahu:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_P, \quad (4.1)$$

kde značí: β - objemovou roztažnost; V - objem látky; dV - diferenciál objemu; dP - diferenciál tlaku; P - konstantní tlak.

Další možností je použití pravé délkové roztažnosti, jejíž hodnoty se experimentálně získávají snadněji. Součinitel pravé teplotní roztažnosti (α) lze vypočítat:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dT} \right)_P, \quad (4.2)$$

kde značí: l - délku tělesa; dl/dT - změnu délky tělesa v závislosti na teplotě; P - konstantní tlak.

Objemová roztažnost izotropního materiálu je trojnásobkem délkové roztažnosti:

$$\beta = 3\alpha. \quad (4.3)$$

Pokud formovací směsi po ochlazení opět získávají svůj původní objem, pak toto teplotní roztažení se nazývá vratné. Liší se od dodatečného trvalého roztažení, které spočívá ve změně fázového složení a struktury směsi.

Na teplotní roztažnosti směsi závisí i napětí, které vzniká ve formách nebo v jádrech rychlým zahříváním nebo ochlazováním. Tím má teplotní roztažnost značný vliv na odolnost směsi proti náhlým změnám teploty. Teplotní roztažnost těchto směsí závisí pouze na jejich chemicko-mineralogickém složení. Teplotní roztažnost kompaktních formovacích a jádrových směsí bývá obvykle charakterizována, RUSÍN [4] středním součinitelem teplotní roztažnosti nebo procentem teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost se sleduje na různých těliscích vytvořením zhuštěním formovací nebo jádrové směsi, nejčastěji jejich rozměr bývá $\varnothing 8 \times 50$ mm.

Střední součinitel teplotní roztažnosti se stanovuje dle vztahu:

$$\alpha_{STŘ} = \frac{l_T - l_{T_0}}{l_{T_0} \cdot (T - T_0)}, \quad (4.4)$$

kde značí: l_T - délku zkušebního tělesa při teplotě měření; l_{T_0} - délku zkušebního tělesa při teplotě 20 °C; T - teplotu měření; T_0 - teplotu vzorku na počátku měření (20 °C).

Procento, resp. procentuální teplotní roztažnost lze stanovit:

$$\frac{l_T - l_{T_0}}{l_{T_0}} \cdot 100 [\%] \quad (4.5)$$

Pro určení vlastností formovacích a jádrových směsí není důležitý jen střední součinitel teplotní roztažnosti nebo procentuální teplotní roztažnost, ale je také důležitá rovnoměrnost roztažnosti směsí v celém intervalu teplot při jejím ohřevu. K vyjádření rovnoměrnosti roztažení se používá tzv. pravý součinitel teplotní roztažnosti (4.2).

V tabulce 4-1 jsou uvedeny teplotní roztažnosti různých chemických prvků a některých chemických sloučenin, dle ČERNOCHA [79] a RAŽNJEVIČE [80].

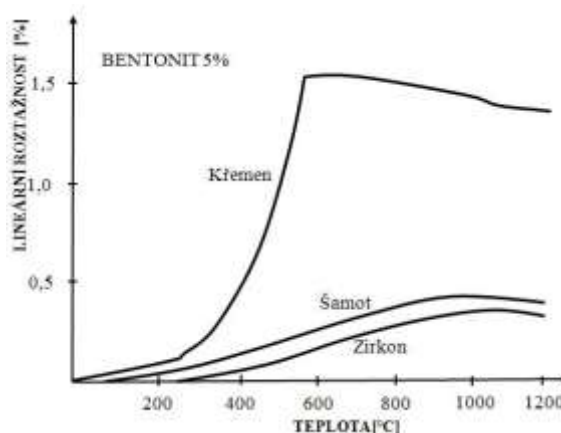
Tabulka 4-1 Přehled lineárních teplotních součinitelů vybraných druhů látek [79], [80]

Prvek nebo sloučenina	Hodnota součinitele lineární teplotní roztažnosti [K^{-1}]	Platnost pro teplotu [$^{\circ}C$]
Křemík	$2,4 \cdot 10^{-6}$	20
Hliník	$23,7 \cdot 10^{-6}$	20
Železo	$12,3 \cdot 10^{-6}$	20
Zinek	$29 \cdot 10^{-6}$	20
Křemen k ose kryst. $\parallel$	$8 \cdot 10^{-6}$	0 - 100
Křemen k ose kryst. $\perp$	$14,4 \cdot 10^{-6}$	0 - 100

U disperzních soustav, resp. kapilárně pórovitých látek (což jsou např. formovací směsi), jsou dilatační změny ovlivněny:

- teplotní roztažností ostřiva;
- teplotní roztažností, popř. smrštivostí, pojiva;
- fázovými přeměnami složek jádrové nebo formovací směsi;
- rozkladem, spalováním a destilací složek směsi.

Měřením roztažnosti pevných látek během tepelného namáhání se zabývá dilatometrie a zařízení, které se používá pro měření těchto délkových změn, se nazývá dilatometr. Pro sledování teplotní dilatace formovacích a jádrových směsí slouží speciálně zkonstruované slévárenské dilatomery, které mohou být opatřeny ochrannou atmosférou. Na obr. 4-1 je znázorněn průběh teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě pro různé typy ostřiv s 5 % bentonitu.



Obr. 4-1 Závislost teplotní roztažnosti na teplotě vybraných ostřiv s 5 % bentonitu, [4]

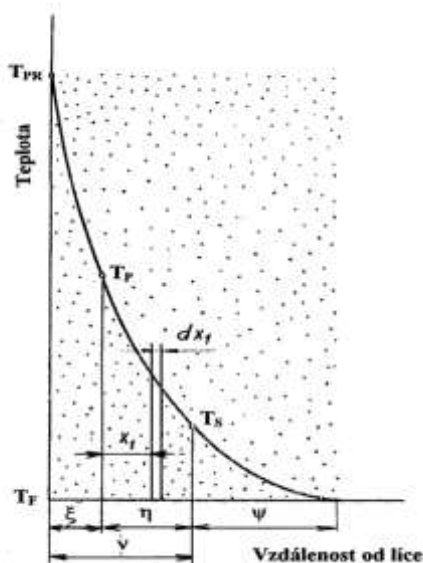
4.3 Mechanismus vzniku a vývinu plynů a par v pískových formách

Po odlití, kdy dojde ke styku taveniny kovu s lícem slévárenské formy, nastává sdílení tepla z taveniny do formy. V důsledku toho dochází k postupnému prohřívání jednotlivých vrstev formy. Rychlost prohřívání, resp. hloubka prohřívání formy na určitou teplotu T , závisí na teplotních podmínkách rozhraní tavenina – forma a na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy (tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, součinitel přestupu tepla, hustota, atd.). Na základě zjednodušujících předpokladů, lze hloubku prohřátí formy H_F v určitém časovém okamžiku t a při určité teplotě T vypočítat dle vztahu:

$$H_F = K_F \cdot \sqrt{t}, \quad (4.6)$$

kde značí: K_F – koeficient prohřátí formy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$]; H_F – hloubku prohřátí formy [m]; t – dobu ohřevu formy [s].

V důsledku prohřátí, resp. vlivem tepelných a fyzikálních účinků ve formě, některé složky formovacích a jádrových směsí prodělávají významné fyzikálně-chemické přeměny, které doprovází uvolňování plynů (vypařování vody, vývin plynů při hoření přísad, rozklad vznikajících plynů, destilace pevných a kapalných látek, uvolňování vázané vody a ostatních kapalných látek i rozpínavost ohřátých plynů formy). Schopnost formovacích materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry se nazývá plynotvornost. Teoretickým řešením tohoto problému se zabýval RYŽIKOV a SPASSKIJ [17]. Na obr. 4-2 je naznačeno rozložení teploty ve stěně pískové formy, současně jsou označeny vrstvy dle příslušné teploty, podle [17].



Obr. 4-2 Rozložení teplot v pískové slévárenské formě s označením vrstev, [17]

1. vrstva ξ – je definována teplotním intervalem T_{PR} a T_P (T_{PR} – teplota na lici formy, T_P -teplota při které končí vylučování plynné fáze). Vývin plynů v této vrstvě je již ukončen.
2. vrstva η - je v teplotním rozmezí T_P až T_S (T_S – teplota, kdy dochází k vylučování plynů ve formě).
3. vrstva ψ - je popsána teplotním intervalem T_S až T_F (T_F – počáteční teplota formy).
V této vrstvě nejsou potřebné teplotní podmínky a proto zde nedošlo k vylučování plynů.

Při řešení nás zajímá především množství uvolněných plynů k danému časovému okamžiku. To znamená uvolněné plyny z vrstev 1. a 2. Plyny z vrstvy 1. se již uvolnily a plyny z vrstvy 2. se vylučují. Oblast formy, která zahrnuje uvolnění plynů, je $\xi + \eta$. Ve vrstvě ξ se plyny již uvolnily a ve vrstvě η se právě uvolňují. K řešení lze využít Gaussova integrálu chyby. Množství uvolněných plynů z obou vrstev lze vypočítat:

$$Q = s \cdot \rho_F \cdot q_{TP} \cdot \sqrt{a} \cdot \left\{ \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[\frac{(T_{PR} - T_P)}{(T_{PR} - T_F)} \right] + \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left[\frac{(T_{PR} - T_S)}{(T_{PR} - T_F)} \right] \right\} \cdot \sqrt{t} = A \cdot \sqrt{t}, (4.7)$$

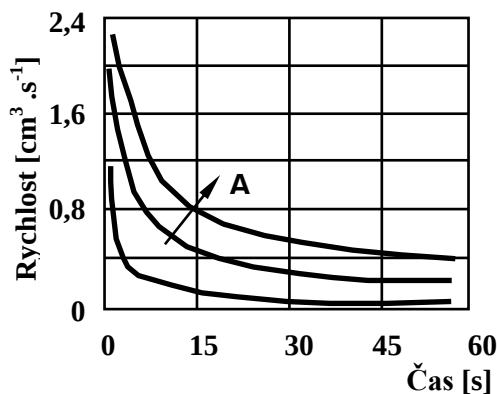
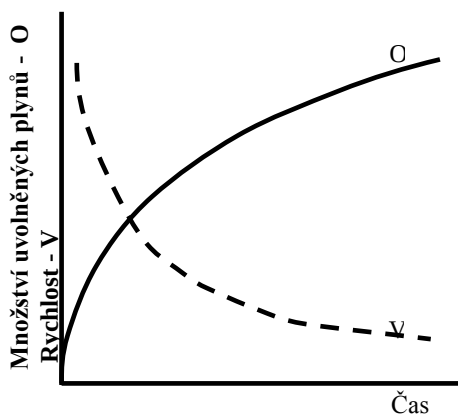
kde značí: s - procento pojiva ve formovací směsi; ρ_F - hustotu formy; q_{TP} - měrné množství vyloučených plynů při teplotě T_P (vztaž. k 1 % pojiva); a - střední teplotní vodivost formy; A - součinitel plynotvornosti směsi; t_p - čas vývinu plynů.

Rychlost uvolněných plynů lze vypočítat:

$$v = \frac{dQ}{dt} = \frac{A}{2\sqrt{t}}, \quad (4.8)$$

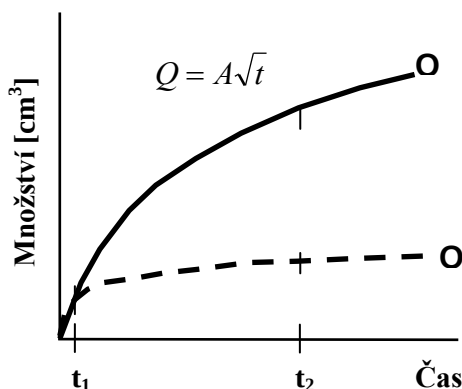
kde značí: v - rychlost uvolňování; Q - objem uvolněných plynů; t_p - čas vývinu plynů;
 A - součinitel plynutvornosti směsi.

Na obr. 3-3 je uvedeno množství uvolněných plynů formy v závislosti na čase. Na obr. 3-4 je znázorněn vliv součinitele plynutvornosti směsi na rychlost uvolňování plynů. Vliv tloušťky stěny odlitku na množství vývinu plynů z formy je na obr. 3-5. Současně je zřejmé, že množství plynů uvolněných z formy je úměrné teplu, které forma přijala z tuhnutí odlitku.



Obr. 4-3 Závislost množství uvolněných plynů na čase, [12]

Obr. 4-4 Vliv součinitele plynutvornosti na rychlost vývinu plynů formy, [12]



Obr. 4-5 Vliv tloušťky stěny odlitku na množství vývinu plynů formy, [12]

4.3.1 Plynotvornost formovacích a jádrových směsí

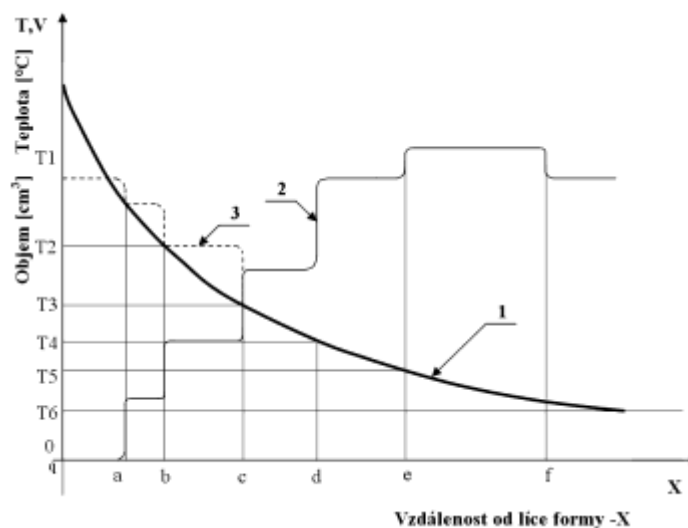
Plynotvornost je schopnost formovacích (jádrových) materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry. Jsou to nežádoucí děje popisující dílčí chování těchto disperzních materiálů při vysokých teplotách krátce po zalití slévárenské formy a tudíž by měla hodnota plynotvornosti vykazovat co nejnížší hodnoty. V průběhu tuhnutí taveniny ve slévárenské formě se začínají prohřívat povrchové vrstvy. V pískové formě, která představuje porézní těleso, se vrstvy formy začnou postupně prohřívat od líce. Pokud tyto vrstvy dosáhnou kritické teploty (např. teplota vypařování vody, teplota rozkladu příslušné složky, atd.), dochází v těchto vrstvách k uvolňování plynů a par.

Plynotvornost vyjadřujeme v cm^3 na 1 g směsi, případně na cm^3 směsi. Množství uvolňujících se plynů v pískové formě je dáno druhem pojiva a jeho podílu ve směsi, sklonem k navlhavosti směsi (způsobem sušení), zrnitostí ostřiva (prodyšností jader) a obsahem různých přísad určených k vyvolání vytvrzovacích reakcí, či k cíleným technologickým požadavkům na samotná jádra. Škodlivý vliv těchto plynných produktů závisí na jejich množství, na prudkosti jejich vývinu a na jejich složení.

Kromě množství uvolněných plynů je důležitá i kinetika jejich vývoje, ale i časový okamžik uvolnění v procesu tuhnutí kovu. Ze složek formovací směsi vykazuje značnou plynotvornost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, pojiva, organické přísady a další látky.

Vznikající plyny tvoří směs, kde převládají redukční složky (CO , H_2). Jejich únik z místa vzniku do volné atmosféry se projevuje určitým tlakem. Ten je závislý na množství, rychlosti vývinu plynů a odporu kladeným formou. Při vysokých hodnotách tohoto tlaku v blízkosti líce formy může dojít k proniknutí plynů do taveniny v dutině formy a tím ke vzniku plynových bublin v odlitku.

Uvolňování plynů a par ve formách či v jádrech začíná na rozhraní formy a taveniny (na líci formy) a tato oblast vývinu plynů se posouvá hlouběji do formy, dle teploty ohřevu formy a dle teplot rozkladu jednotlivých složek směsi. Podrobnější popis průběhu uvolňování plynů v jednotlivých vrstvách formy (odpovídají určité teplotě T) v čase t je uveden na obr. 4-6.



x – vzdálenost od líc formy, 1 – průběh teploty ve formě v daném časovém okamžiku,
 2 – zbytková plynatvornost směsi, 3 – objem plynů uvolňujících se v jednotlivých vrstvách formy,
 0-q- přírůstek vlhkosti v kondenzační zóně

Obr. 4-6 Grafická závislost objemu plynů a teploty formy na vzdálenosti od jejího líce [1]

Z obrázku 4-6 je patrné, že po odlití se ve stěně formy vytváří několik vrstev s různým stupněm vývinu plynu. Tloušťka každé vrstvy v daném okamžiku je určena rozdělením teplot ve formě a hodnotami teplot rozkladu jednotlivých složek směsi. Nejprve se rozkládají komponenty s nejnižší teplotou rozkladu, postupně s vyšší teplotou rozkladu.

V zóně bezprostředně u odlitku, během krátkého času po odlití kovu, probíhá uvolnění veškerých plynů a par v důsledku prohřívání směsi. Za touto vrstvou se nachází zóny rozkladu určitých látek. Tyto zóny začínají uvolněním chemicky vázané vody z bentonitu (u syrových forem) a minerálních příměsí, rozložením některých látek a končí vypařením mechanicky přimísené vody (zóny 0-d). Poté následují zóny kondenzace plynů a par (e-f) a nakonec vrstva směsi, kde žádné změny nenastávají.

Hranice mezi vrstvami nejsou ostré (přechodné zóny), zejména v těch případech, kdy se složky rozkládají v intervalu teplot (chemicky nestejnorodé látky). Důsledkem vzniku těchto vrstev je ztráta počátečních stejnorodých vlastností slévarenské formy (jádra). Především mechanických a tepelně – fyzikálních vlastností.

Rychlost posunu zplyňování látek do nitra formy závisí na kritické teplotě rozkladu, tepelné vodivosti směsi a na teplotě rozhraní tavenina - forma. Se zvyšující se

teplotou rozkladu látek se snižuje rychlost posunu zón. Tabulka 4-2 popisuje kritické teploty rozkladu některých látek. Tabulka 4-3 orientačně popisuje hodnocení tvorby plynů u různých chemických procesů.

Tabulka 4-2 Rozkladné teploty některých látek [5]

Plynotvorný podíl ve směsi [hmot. %]	Kritické teploty rozkladu [°C]
Voda	100
Jílové pojivo	200 až 400
Vápenec (CaCO_3)	860 až 910
Sulfitové pojivo	220 až 260
MF pryskyřice	280 až 320
FF pryskyřice	650 až 750

Tabulka 4-3 Orientační hodnocení různých procesů tvorby plynů procentuálně z celkového množství plynů při lití [5]

Procentuální podíly z celkového obsahu uvolněných plynů [%]			
Procesy tvorby plynů	Syrové formy	Vysušené formy	Skořepinové formy
Vypaření vody obsažené ve směsi	50 až 60	8 až 12	3 až 5
Spálení organických látek	2 až 3	5 až 8	2 až 10
Destilace organických látek	30 až 40	45 až 65	80 až 90
Uvolnění H_2O z minerálů	0,5 až 8	15 až 25	0,5 až 2
Rozklad minerálních příměsí	1 až 5	1 až 5	1 až 2
Expanze vzduchu	do 0,5	do 1	do 0,5
Disociace plynů	6 až 9	8 až 12	10 až 15

Plynotvornost, jako vlastnost formovacích a jádrových směsí, se sleduje téměř od počátků rozvoje a uplatnění různých druhů směsí. Během vývoje byly navrženy různé metody měření (viz kapitola 5.1).

Mezi hlavní příčiny vzniku plynů ve formách se řadí procesy:

- tepelná roztažnost vzduchu v dutině formy a v pórech formovací a jádrové směsi;
- vypařování volné vody a jiných kapalných látek (např. rozpouštědel) z formovací směsi;
- dehydratace jílových pojiv ve formovací směsi;
- tepelná disociace vodní páry, vznikající vypařováním volné vody z formovací směsi, nebo dehydratací jílových pojiv ve formovací směsi;
- tepelná disociace uvolňujících se plynů;
- suchá destilace a spalování organických látek, zejména pojiv;
- karbonizace a spalování uhlíkatých přísad (např. kamenouhelného prášku);
- spalování organických látek;

- i) destilace různých tuhých a kapalných organických látek;
- j) tepelný rozklad minerálů;
- k) rozklad uhličitánů (např. uhličitánu vápenatého).

4.3.2 Způsoby vzniku plynů u formovacích a jádrových směsí [1]

Vypařování vody a jiných rozpouštědel

Vypařování vody se nejvíce projevuje u směsí obsahujících vodu jako rozpouštědlo pojiv (např. jílu v syrových pískových formách, kde je voda hlavním vypařujícím se elementem). Kromě vody může směs obsahovat i jiné vypařující se kapaliny. Voda obsažená ve formovacích směsích se nechová jako prostá mechanická přímísenina. Navlhání směsí, ale i opačný proces, jako vysoušení, je provázen složitým komplexem fyzikálně – chemických jevů. Voda obsažená ve formovacích i jádrových směsích je s minerálními i organickými složkami směsi vázána:

- a) *chemicky* – voda je součástí krystalové mřížky minerálních složek směsi a vzniká při chemických reakcích a při vzniku krystalohydrátů. Lze ji uvolnit při poměrně vysokých teplotách, charakteristických pro daný materiál (minerál).
- b) *fyzikálně chemicky* – voda tvoří disperzní prostředí koloidních soustav pojiv (např. jílu, kde nastává vzájemné rozpouštění vody a látky). Dále tato vazba vzniká při adsorpčních procesech. K jejímu uvolnění je třeba přivést také značné množství tepelné energie.
- c) *mechanicky* – voda je ve směsích držena v důsledku smáčivosti v kapilárách mezi jednotlivými částicemi směsi. Vazba je dána kapilárními silami a silami smáčení. Prvé záleží na povrchovém pnutí kapaliny a kapilárního tlaku a druhé jsou určeny charakterem a stavem povrchu kontaktujících se materiálů. Také odpařování takto vázané vody se odlišuje od procesu vypařování vody volně, mechanicky přímísené, která se ve směsích také vyskytuje, ale která má např. od kapilární vody jiné vlastnosti.

Spalování (hoření, oxidace) organických látek

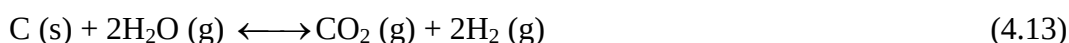
Spalování ve směsích probíhá za přítomnosti oxidovadel (vzdušný O_2 obsažený v pórech jádra nebo přicházející kapilárami formy či jádra, dále vodní pára a CO_2). Vzdušný O_2 v pásmu hoření může prostupovat prostřednictvím difuze přes póry směsi a kromě toho vzduch je obsažen na začátku procesu v pórech. Ve skutečnosti jsou

zdroje kyslíku omezené a nemohou zajišťovat intenzivní průběh oxidace organických látek. Průchod vzduchu přes póry formy po jejím naplnění tekutým kovem se prakticky zastavuje, protože vzniká velký vstřícný proud plynů, který směřuje od odlitků do atmosféry. Množství kyslíku v pórech, ve srovnání s množstvím vznikajících plynů, je malé.

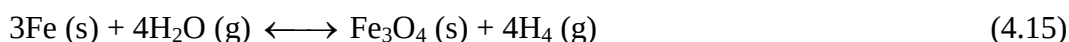
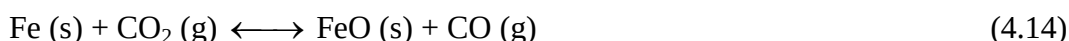
Významné jsou reakce oxidace tuhého uhlíku :



Větší praktický význam mají však reakce okysličování tuhého uhlíku vodními parami a CO_2 . Oxidační reakce uhlíku oxidem uhličitým probíhá intenzivně při teplotách více než 800°C . Uhlík intenzivně reaguje i s parami vody při vysoké teplotě, přičemž do 810°C (v hloubce formy) se přeměňuje v CO_2 a při vyšší teplotě (u povrchu formy) se přeměňuje v CO :



Ve formách mohou probíhat i jiné reakce:



Celkově je možno říci, že v pískových formách (jádrech) se vytváří a neustále obnovuje atmosféra složená z různých plynů a probíhá neúplné okysličení C na CO, jehož přítomnost ve velkých množstvích v atmosféře lící formy je experimentálně potvrzena. V případě volného přístupu vzduchu z formovacího materiálu ohřátého na vysokou teplotu, organické látky úplně shoří s přednostním vznikem CO_2 .

Tepelný rozklad organických látek (destilace)

Pomalý tepelný rozpad organických látek probíhá bez přístupu nebo s omezeným přístupem vzduchu (či jiného oxidovadla). Dochází k poruše struktury a k destilaci nejprve lehčích a po zvýšení teploty i těžších frakcí (nejprve se uvolňují těkavější frakce). Konečným produktem destilace je koks.

V licí formě se reakce liší od popsaného schématu tím, že se organické látky nacházejí v disperzním stavu, což vede při rychlém ohřevu licí formy k narušování pořadí uvolňování jednotlivých frakcí. V tomto případě vzniká jediná směs par a plynů, jejíž jednotlivé komponenty mají rozdílnou teplotu kondenzace. Chemické složení plynů při termickém rozpadu je charakteristické přítomností většího množství par H_2O , olejů, nasycených a nenasycených uhlovodíků, dále je přítomen H_2 , určité množství CO a CO_2 a jiné plynné či kapalné produkty.

Za nepřítomnosti O_2 v pórech směsi nedochází ke shoření produktů reakce. Během procesu filtrace kondenzuje část těchto produktů a zůstává ve směsi. Ta část, která nekondenzuje, uniká do atmosféry.

Destilace se významně uplatňuje při ohřevu směsí obsahujících větší množství organických pojiv (syntetické pryskyřice, uhelná moučka). Tento zdroj je aktuální pro všechny jádrové a formovací směsi.

Tepelný rozklad minerálů

Probíhá při ohřevu některých minerálů obsažených ve směsi, přičemž se uvolňuje plynná složka (některé minerály mají vysokou plynotvornost, např. 1 kg CaCO_3 uvolňuje $0,224 \text{ dm}^3$ plynu CO_2 , viz tab. 4-1 - Výsledky výpočtů uvolněných plynů z uvedených rovnic v kapitole 4.1. - Výpočty uvolněných plynů pro sledované chemické reakce viz rovnice).

Součástí minerálů je i voda, která se v minerálech váže ve třech podobách:

- *konstituční voda* – má nejpevnější vazbu s krystalickou mřížkou. Uvolňuje se při určité teplotě, obvykle při vypalování nebo při chemické reakci. Tento proces není vratný a minerál zbavený konstituční vody se rozpadá.
- *krystalizační voda* – má mnohem slabší vazbu než předchozí a uvolňuje se při žíhání někdy ve dvou i třech tepelných intervalech. V mnohých případech se při namočení krystalizační voda opět naváže na minerál.
- *volně vázaná voda* – proniká do krystalické mřížky, ale není chemicky vázaná. Její vazba je daná délkou kontaktu vody s minerálem, teplotou, tlakem a jinými faktory.

Disociace plynů

Může nastat u plynů uvolňujících se v důsledku některého z popsaných dějů. Nejčastěji se takto rozkládají při vysokých teplotách uhlovodíky a dochází přitom ke zvětšování objemu plynné fáze a k usazování uhlíku ve formě sazí v pórech směsi, jako např.:



Plyny mohou vstupovat do reakce jak mezi sebou, tak s látkami slitiny a formy (probíhají při současném zvětšování objemu, což se projevuje zvyšováním rychlosti úniku plynů z formy).

Rozpínání vzduchu

Objem vzduchu a dalších plynů uzavřených v pórech mezi částicemi disperzní směsi, činí asi 26 až 38 % objemu směsi (v závislosti na stupni zhuštění). Při ohřevu formy či jádra se objem tohoto plynu bude zvětšovat. Ve většině případů se však toto zvětšení objemu, při ohřevu na teploty 500 až 700 °C, bude podílet pouze malou částí na celkovém objemu uvolňujících se plynů a to jen velmi krátkou dobu (pouze několik sekund po zaplnění formy taveninou). Vzduch uzavřený v dutině formy odchází převážně přes výfuky a v omezeném množství přes póry forem a jader.

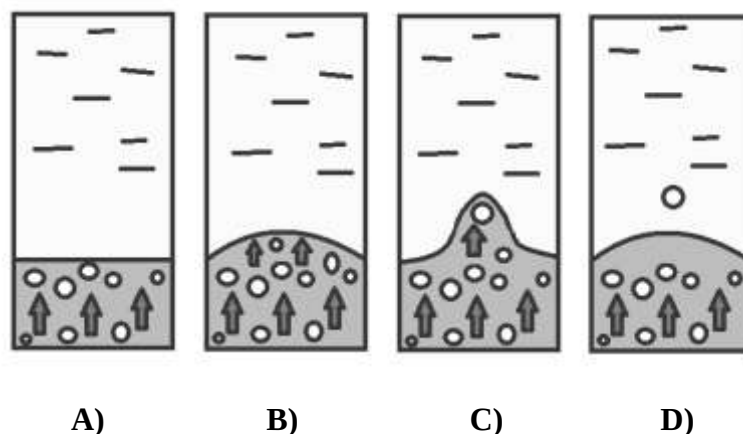
4.3.3 Popis vzniku a pronikání plynu z formy nebo jádra do taveniny

Ve slévárenské praxi je nutné, aby se plyny z formy neuvolňovaly do dutiny formy, resp. do taveniny. Při nevhodných energetických a tlakových podmínkách na rozhraní kov – forma, mohou plyny často pronikat do taveniny a naopak. Plyny z formy do taveniny mohou vniknout dle této rovnice:

$$p_F = p_m + p_p + p_{pf} \quad (4.18)$$

kde značí: p_F - tlak plynů ve formě; p_m - metalostatický tlak; p_p - odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny; p_{pf} - přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu.

Největší rychlost vývinu plynů nastává v okamžiku styku roztaveného kovu s formou, popř. s jádrem, při počátku lití, kdy je malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak. Na obr. 4-7 je uveden časový vývoj plynové bubliny uvolňované z formovací směsi do tekutého kovu.



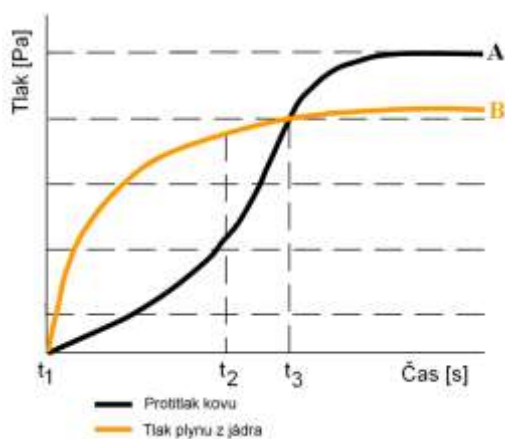
Obr. 4-7 Schématické naznačení vniknutí plynu do taveniny ($p_F \geq p_m + p_p + p_{pf}$), [7]

V prvním okamžiku po odlití se začnou uvolněné plyny shromažďovat na hranici formy a taveniny, ale zatím nepronikají do taveniny (viz obr. 4-7A). V důsledku toho, že tlak plynů ve formě neustále vzrůstá, expanze plynů do taveniny je velmi výrazná, čímž tlak plynů formy začne překonávat odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny (viz na obr.4-7B a 4-7C). Dalším zvýšením tlaku se bublina, která se dosud stále držela při hranici formy a taveniny, vlivem povrchových napětí, zaškrtní a uvolní se do taveniny (viz obr.4-7D). Uvolnění nastane při překonání metalostatického tlaku. Tento mechanismus se opakuje do doby, než skončí chemické změny ve formě a tím se již nezvyšuje tlak na taveninu.

Plynotvornost směsi není jen dílčí vlastnost směsi, ale je nutné ji posoudit s ostatními podmínkami, např. prodyšností směsi, styčnou plochou jádra s kovem, průřezem známek, metalostatickým tlakem atd. Přetlak plynů je funkční závislostí těchto veličin (obsah a druh spalitelných látek, styčná plocha kovu s jádrem, objem jádra, průřez známek, odvzdušnění, prodyšnost směsi).

Aby plyny pronikaly kovem, musí být jejich tlak v daném okamžiku větší, než je tlak kovu. Vývoj plynů v jádře je nejintenzivnější v prvních okamžicích po odlití formy, a proto je vznik vad způsobených plynem v prvních sekundách nejpravděpodobnější. Tlak plynů v jádře závisí i na geometrických charakteristikách jádra, např. na velikosti plochy styku mezi jádrem a kovem, dále na délce dráhy filtrace plynu v jádru (zkrátíme-li délku dráhy plynů, silně poklesne tlak plynů). Pokud sledujeme tlakové poměry při vzniku vad odlitků v důsledku vývinu plynů v závislosti na čase, lze konstatovat, že velký význam sehrává tlak taveniny působící proti přetlaku plynů jádra nebo formy,

viz obr. 4-8. Na tomto obrázku křivka A znázorňuje časový průběh protitlaku taveniny a křivka B časový vývin tlaku plynů formy včetně jádra. Z tohoto obrázku je zřejmé, že v prvních okamžicích po odlití (např. v čase t_2) vzniká velký vývin plynů, nejen z formovací směsi, ale také např. při použití pravého jádra. Pravé jádro se obzvláště velmi rychle prohřívá vlivem tepla z taveniny, která jádro obklopuje. Protože dutina formy je v prvních okamžicích pomalu zaplňována taveninou, vykazuje malý tlak proti působícímu tlaku plynů uvolňovaných formou. Teprve po určité době (např. t_3), dojde k vyrovnání tlaků a pak začne ustávat uvolňování plynů z formy a tlak kovu, resp. taveniny začne převládat. V tomto okamžiku již není nebezpečí vzniku plynových bublin v odlitku.



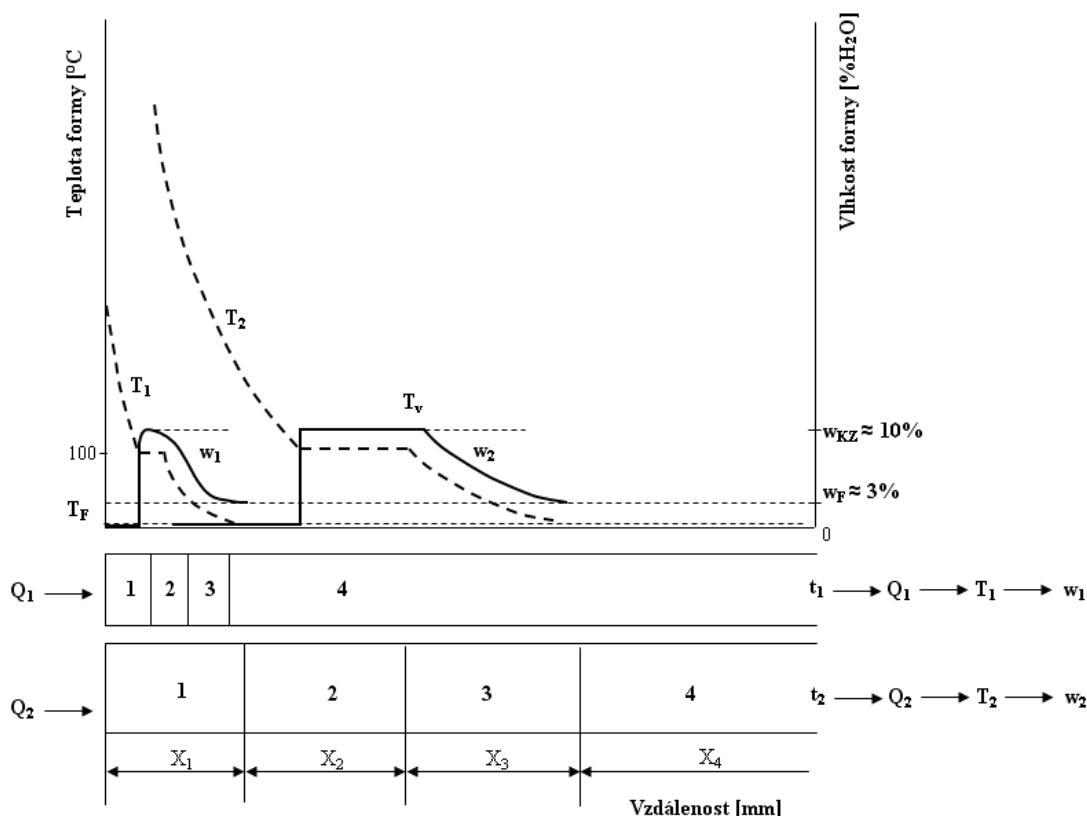
Obr. 4-8 Tlakové poměry při vzniku plynových vad, [16]

4.3.4 Kondenzační zóna při tepelném ovlivnění směsí s vodou

Následkem prostupu tepla pískovou formou vzniká kondenzační zóna. Po odlití tekutého kovu do dutiny pískové formy, dochází důsledkem prostupu tepla z tuhnoucí taveniny k prudkému prohřívání vrstev při lici formy.

Během dosažení teploty varu se začne vypařovat vlhkost v pískové formě a kapilárně proniká do nitra formy. Tím se vytvoří fronta vypařování, která se postupně posouvá do vzdálenějších míst. Oproti tomu povrchové části formy se tímto vysušují a teplota rychle vzrůstá. V oblastech slévárenské formy, kde je teplota nižší než 100 °C, tedy teplota vypařování, vzniká kondenzační zóna. Pára zde kondenzuje a tím v této vrstvě narůstá obsah vody. Zároveň vlivem uvolňování výparného tepla roste i teplota této vrstvy. Schéma vzniku kondenzační zóny je na obr. 4-9.

Proces vypařování a zahřívání výparným teplem se stále opakuje a kondenzační zóna postupuje neustále do hlubších vrstev formy.



Obr. 4-9 Schéma vzniku kondenzační zóny, [12]

Čárkovaná křivka představuje průběh teplot, resp. teplotní gradient od líce (nahřívaného povrchu) do hloubky stěny formy. Plná křivka udává obsah vlhkosti (koncentrační gradient) ve formě. Počáteční teplota formy je T_F a výchozí vlhkost formy w_F . Začne-li z tuhnoucí taveniny přecházet teplo do formy, pak např. v časovém okamžiku t_1 přejde do formy teplo Q_1 , které vytvoří při líci formy teplotní gradient T_1 a v těchto partiích formy se ustaví vlhkost w_1 . Analogicky je tomu v okamžiku t_2 , kdy již přejde do formy větší množství tepla Q_2 , ustaví se vyšší teplotní gradient T_2 a jemu odpovídající vlhkost w_2 . Na základě těchto skutečností lze takto ovlivněnou část formy (tepelně i vlhkostně) rozdělit na tři oblasti:

1 - vysušenou vrstvu (x_1) - kdy již proběhl proces vypařování vody a obsah vody je zde téměř nulový. Sdílení tepla zde probíhá podle zákonů suchého disperzního prostředí.

2 - kondenzační zónu (x_2) – v této vrstvě kondenzují páry, které uvolňují teplo a proto vzniká prodleva s konstantní teplotou vypařování T_V (100 °C). Kondenzací par se zvyšuje v této vrstvě obsah vody na w_{KZ} (obsah vody v kondenzační zóně), která se podle experimentálních výsledků pohybuje cca kolem 10 %, tj. asi trojnásobek výchozího stavu.

3 - vrstvu těsně za kondenzační zónou (x_3) – v této vrstvě klesá teplota z T_V do výchozí teploty T_0 a obsah vlhkosti se snižuje z w_{KZ} na výchozí obsah vlhkosti w_F .

Za touto vrstvou se nachází další (v pořadí čtvrtá) tepelně a vlhkostně neovlivněná vrstva (x_4). Teplota a vlhkost této vrstvy odpovídají výchozímu stavu.

Vypařování vody probíhá na hranici 1 a 2 oblasti. Páry prostupují filtraci přes zónu 2 a kondenzují na hranici 2. a 3. Proces vypařování a kondenzace se řídí termodynamickými podmínkami, proto může zkondenzovat jen tolik páry, kolik uvolněného tepla je zapotřebí v celé vrstvě 2 k dosažení teploty vypařování T_V , i když obsah pórů ve směsi je objemově větší, než množství zkondenzované vody. To je příčinou, proč nejsou všechny póry a dutiny mezi zrny v kondenzační zóně vyplněny vodou. Pokud by zkondenzovalo větší množství páry, než odpovídá termodynamickým podmínkám, pak by se teplota formy v kondenzační zóně zvýšila značným množstvím uvolněného tepla nad hodnotu T_V a opět by došlo k vypařování přebytečné vody. Též nemůže dojít i na hranici 1. a 2. vrstvy ke vzniku většího množství páry než je nutné, čímž by se spotřebovalo větší množství tepla a teplota na hranici oblasti 1 a 2 by klesla pod T_V a přebytečná pára by opět zkapalněla a uvolněným výparným teplem by se opět teplota formy zvýšila na T_V .

Proces vypařování je spojen se spotřebou tepla a přeměnou kapalné fáze v plynnou a proces kondenzace, který je doprovázen uvolňováním tepla a přeměnou plynné fáze v kapalnou postupuje ve vlhké formě plynule od líce do vzdálenějších partií stěny formy. Tím stoupá celková tepelná vodivost formy a značně se zvyšuje ve formě přenos tepla **kondukcí**.

Z důvodu, že v kondenzační zóně (pro danou směs a stupeň zhuštění) je obsah vody konstantní, musí se vlivem stoupajícího objemu vody z rostoucí tloušťky x_1 (vysušená vrstva - 1) směrem do vzdálenějších partií rozšiřovat kondenzační zóna x_2 . Oblast s nižší teplotou než je T_V odpovídá velikosti x_3 a v této oblasti postupně se snižuje obsah vlhkosti až na původní hodnotu w_F .

Z obr. 4-9 je také patrný koncentrační gradient vody (vlhkosti) ve stěně formy, který má mezi 1. a 2. oblastí hodnotu w_{KZ} a mezi 2. a 3. oblastí vykazuje rozdíl ($w_{KZ} - w_F$), který vyvolává difúzní děj, při kterém vlhkost prostupuje kapilárami z

kondenzační zóny částečně zpět do vysušené vrstvy (zde se opět odpařuje) a současně do 3. oblasti. Zde se zvyšuje obsah vody nad původní hodnotu w_F .

Při početním řešení přemísťování vlhkosti a vzniku kondenzační zóny v pískové slévárenské formě je důležité stanovení velikostí oblastí x_1 , x_2 , x_3 a obsah vlhkosti w_{KZ} v kondenzační zóně. Při výpočtu je nutné vyjít z tepelné rovnováhy tj. z tepla, které vydal odlitek (dQ_O) a tepla, které přijala slévárenská forma (dQ_F). Lze psát:

$$dQ_O = S \cdot \rho_M \cdot L_{KR} \cdot d\xi_O, \quad (4.19)$$

$$dQ_F = \left[\lambda_F \cdot S \cdot n \cdot \frac{(T_{pF} - T_V)}{x_1} \right] \cdot dt, \quad (4.20)$$

kde značí: S - plochu styku odlitku a formy; L_{KR} - latentní krystalizační teplo materiálu odlitku; T_{pF} - teplotu ohřátého povrchu formy; T_V - teplotu vypařování (kondenzace) za normálních podmínek tlaku při 100 °C; λ_F - součinitel tepelné vodivosti formy; n - stupeň paraboly ($n = 1,75$); ξ_O - tloušťku ztuhlé vrstvy odlitku v časovém okamžiku t .

Tepelnou rovnováhu lze získat spojením vztahů (4.19) a (4.20):

$$S \cdot \rho_M \cdot L_{KR} \cdot d\xi_O = \left[\lambda_F \cdot S \cdot n \cdot \frac{(T_{pF} - T_V)}{x_1} \right] \cdot dt. \quad (4.21)$$

K určení proměnné tloušťky vysušené oblasti x_1 je nutné určit další tepelnou rovnováhu na slévárenské formě:

$$Q_F = dQ_{AK} + dQ_V \quad (4.22)$$

Člen dQ_{AK} představuje přírůstek tepla, které akumuluje vrstva x_1 zvětšením její tloušťky na $x_1 + dx_1$:

$$dQ_{AK} = \frac{1}{(n+1)} \cdot S \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot (T_{pF} - T_V) \cdot dx_1, \quad (4.23)$$

kde značí: ρ_F - hustotu materiálu 1. vrstvy formy; c_F - měrnou tepelnou kapacitu 1. vrstvy.

Člen dQ_V vyjadřuje množství tepla (výparného), které je nutné k vypaření vody na hranici 1. a 2. oblasti:

$$dQ_V = \left[\frac{S \cdot L_V \cdot w_{KZ} \cdot \rho_F}{1 - w_{KZ}} \right] \cdot dx_1, \quad (4.24)$$

kde značí: ρ_F - hustotu převlhčené směsi v kondenzační zóně

(v oblasti 2.) $\rho_F = \rho_F / (1 - w_{KZ})$;

L_V - výparné teplo vody.

Dosazením vztahů (4.18), (4.21) a (4.22) do rovnice (4.20) lze stanovit tloušťku x_1 vysušené vrstvy při lici formy:

$$x_1 = \sqrt{\frac{n \cdot (n+1) \cdot a_F \cdot t}{1 + \frac{[(n+1) \cdot w_{KZ} \cdot L_V]}{c_F \cdot (1 - w_{KZ}) \cdot (T_{pF} - T_V)}}}, \quad (4.25)$$

kde značí: a_F - součinitel teplotní vodivosti vysušené vrstvy formy.

Při výpočtu obsahu vody v kondenzační zóně lze vycházet z předpokladu termodynamického rovnováhy - forma se zahřeje na teplotu vypařování T_V teplem, které se uvolnilo kondenzací páry:

$$(w_{KZ} - w_F) \cdot L_V = c_{F \text{ poč}} \cdot (T_V - T_F), \quad (4.26)$$

kde značí: $c_{F \text{ poč}}$ - měrnou tepelnou kapacitu formy při počáteční vlhkosti w_F .

Měrnou tepelnou kapacitu $c_{F \text{ poč}}$ pro teplotní interval od T_F do T_V vypočítáme ze vztahu:

$$c_{F \text{ poč}} = c_F \cdot (1 - w_F) + w_F \cdot c_V, \quad (4.27)$$

kde značí: c_F - střední měrnou tepelnou kapacitu materiálu formy při teplotním intervalu T_F až T_V ;

c_V - měrnou tepelnou kapacitu vody.

Ze vztahů (4.24) a (4.25) lze vyjádřit vlhkost kondenzační zóny:

$$w_{KZ} = \frac{[c_F \cdot (1 - w_F) + w_F \cdot c_V \cdot (T_V - T_F)]}{L_V} + w_F. \quad (4.28)$$

Šířka druhé oblasti - kondenzační zóny x_2 je dána množstvím vypařené vody z vysušené oblasti 1. Vznikající pára na rozhraní oblastí 1 a 2 prostupuje do oblasti 3. V této vrstvě kondenzuje a současně zahřívá tuto oblast až na teplotu vypařování T_V a tím se rozšiřuje 2. oblast (kondenzační zóna). Teplota ve 3. oblasti se mění od teploty

kondenzace T_V do teploty T_F . Oblast 2 v podstatě tvoří ohřívací stěnu. Opět rozložení teploty ve 3. vrstvě lze nahradit náhradní křivkou n -tého stupně (nejčastěji parabolou). Z toho plyne, že zvýšení teploty v libovolném místě 3. oblasti je úměrné vlhkosti. Lze psát:

$$w_3 = (w_{KZ} - w_F) \cdot \left(1 - \frac{x}{x_3}\right)^{n_3} + w_F, \quad (4.29)$$

kde značí: w_3 – vlhkost ve 3. oblasti v místě x (tj. rozhraní 2. a 3. oblasti)

n_3 – stupeň náhradní křivky pro 3. oblast ($n_3 = 3$).

Současně lze napsat rovnováhu objemů vlhkosti (vody) v jednotlivých oblastech (vrstvách) formy. Vychází se z toho, že objem vody z 1. oblasti (1. vrstvy) se přemístí kondenzací do oblastí 2 a 3, lze psát:

$$W_1 = W_2 + W_3, \quad (4.30)$$

kde značí: W_1, W_2, W_3 – celkové objemy vody v jednotlivých oblastech.

$$(W_1 = x_1 \cdot w_F; W_2 = x_2 \cdot (w_{KZ} - w_F); W_3 = x_3 (w_{KZ} - w_F) / (n_3 + 1)) [m^3].$$

$$x_1 \cdot w_F = x_2 \cdot (w_{KZ} - w_F) + \frac{x_3}{n_3 + 1} \cdot (w_{KZ} - w_F). \quad (4.31)$$

Vyjádřením x_2 z rovnice (4.31) lze získat vztah pro určení oblasti 2. – kondenzační zóny:

$$x_2 = x_1 \cdot \frac{w_F}{w_{KZ} - w_F} - \frac{x_3}{n_3 + 1}. \quad (4.32)$$

Šířka 3. oblasti (x_3) se mění pouze určitou krátkou dobu a pak zůstává konstantní. Je dána průchodem vlhkosti v kapilárně pórovitém tělese při působení koncentračního spádu ($w_{KZ} - w_F$). Čím je vyšší obsah vody ve směsi w_F , tím se oblast x_3 zužuje. Bylo zjištěno, že tloušťka 3. oblasti je cca 20 až 35 mm. Tato hodnota odpovídá podmínkám při odlévání cínu, mědi, hliníku, litiny i oceli při obsahu vody ve směsi v rozmezí 1 až 8 %.

Na vzniku plynových bublin v odlitku se podílí více činitelů, které se uplatňují současně. Je to volba formovacího materiálu (druh pojiva, jeho množství, navlhavost, zrnitost, způsob sušení a prodyšnost), volba druhu jader a v neposlední řadě na výskyt

bublin mají také vliv vlastnosti kovu (kinetika vývoje plynu, metalostatický tlak, vazkost kovu a rychlost lití).

Z výčtu činitelů vyplývá, že na odstranění negativního účinku plynů z forem, nebo k jeho snížení, můžeme použít tyto tři hlavní metody: volba vhodného pojiva a jeho optimálního množství, regulace prodyšnosti a vhodný odvod plynů a vhodné řízení sušení jader.

5. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PÍSKOVÝCH A JÁDROVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH MATERIÁLŮ

Metody sledování vlastností forem a jader během tepelného namáhání, v našem případě konkrétně měření uvolněných plynů a rozměrových změn během tepelného namáhání, jsou závislé na konkrétních měřených materiálech, dále na potřebné přesnosti měření, dostupném technickém vybavení, správné přípravě vzorků, správném dodržení měřicího postupu a správném zpracování výsledků.

5.1 Experimentální sledování plynotvornosti

Metody sledování **plynotvornosti** lze rozdělit do dvou hlavních skupin, tj. podle toho, zdali laboratorně napodobujeme tepelné namáhání na vzorku jádrové nebo formovací směsi, nebo zdali přímo sledujeme množství uvolněných plynů, které vzniká zalitím jádra definovaného tvaru taveninou o zvolené teplotě. Pak se tyto metody dělí:

- A) nepřímé – laboratorní;
- B) přímé – provozní.

Pro posouzení jakosti formovací nebo jádrové směsi nestačí znát jen velikost objemu uvolněných plynů, ale také čas nutný k jejich vývinu. Teprve posouzením obou veličin plynotvornosti a času je možno posoudit kvalitu směsi. Je obecně známo, že plyny jsou v odlitku nebezpečné pouze do doby, než se vytvoří dostatečně pevná licí kůra odlitku, těsně po odlití, která již brání vniknutí plynů z formy do taveniny a tím ke vzniku vadného odlitku.

Identifikaci množství plynu v závislosti na čase lze provést také dvěma způsoby:

- 1) registrací změny tlaku v závislosti na čase;
- 2) registrací změny objemu v závislosti na čase.

Existuje celá řada metod zjišťování plynotvornosti směsí, doposud nedošlo ke sjednocení podmínek sledování plynotvornosti (liší se např. použitou teplotou ohřevu), takže nelze srovnávat hodnoty plynotvornosti získaných různými zkouškami. Proto je možno porovnávat pouze hodnoty získané stejnou metodou. U některých metod nesledujeme celý průběh vývinu plynů, ale zaměřujeme se pouze na maximální hodnoty (tlaku nebo objemu uvolněných plynů) v příslušném časovém okamžiku [2], [96].

Obecně lze při sledování plynotvornosti aplikovat tyto možnosti:

- a) zahřívání malých vzorků písku na lodičce v laboratorní trubkové peci. Měření vzniklých plynů s vyloučením kondenzátu.
- b) měření plynů vzniklých ze zalitých pokusných jader, a to s vyloučením kondenzátu.
- c) měření tlaku plynů a par, vzniklých v pokusném jádru zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.
- d) měření proudových rychlostí (a tedy i množství plynů a par) v jádru, zalitém nebo ponořeném do roztaveného kovu.

Podrobnější popis metod a zařízení pro měření plynotvornosti je popsán v kapitole 5.1.1 (Metody měření plynotvornosti přímé - provozní) a v kapitole 5.1.2 (Metody měření plynotvornosti nepřímé - laboratorní).

5.1.1 Metody měření plynotvornosti přímé – provozní

Přímé metody jsou založeny na použití buď formy anebo jádra zkoumaného odlitku, popř. speciálně upraveného vzorku jader nebo forem. Směs je napěchována a její ohřev je proveden přímo - tekutým kovem. Velikost objemu vzniklých plynů je sledována tlakoměry nebo plynoměry různých principů a konstrukcí. S poklesem teploty taveniny klesá též intenzita prohřívání směsi. Průběh tlaku se blíží skutečnému průběhu vývinu plynů. Množství plynů se tedy obvykle měří v závislosti na tlaku plynů. Objem uvolňujících se plynů nebo rychlost tvorby plynů je závislý na čase. Pro jakostní charakteristiky se používají součinitelé charakterizující mechanismus plynotvornosti ve formě. Sledované směsi se kolísavě ohřívají vlivem nedokonalého kontaktu s tekutým kovem, což nám umožňuje experimentálně získat vlastnosti reálných odlitků a forem. Existuje několik druhů přímých metod sledování plynotvornosti směsí, které se od sebe liší druhem formy, rozměry vzorků, zaformováním vzorku atd. Tato metoda umožňuje získat lepší představu o chování formy nebo jádra při odlévání a tunutí kovu, než u metody nepřímé.

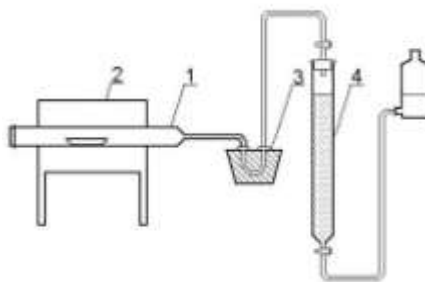
1. Metoda podle Spasského - směs je zaformována v keramickém prstenci. Odvod plynů z jeho středu je pomocí křemenné trubice, která ústí do speciální, hermeticky uzavřené nádoby o vnitřním objemu $19\,300\text{ cm}^3$, která je opatřena speciálním tlakoměrem. Tlakoměr je vlastně membrána z tenkého plechu. Na ni jsou připojeny

tenzometry snímající její průhyb. Objem uvolněných plynů se vypočítá ze znalosti tlaku a vnitřního objemu nádoby.

2. Metoda podle Berga - vzorek je kruhového průřezu $\varnothing$ 150 mm s pracovním povrchem 176 cm². Tloušťka vzorku je cca do 50 mm. Vzorek je vložen do speciálního prstence a zalévá se taveninou až do výše 80 mm. Měří se objem a teplota uvolněných plynů.
3. Metoda podle Jašina – směs je zaformována do speciálního tvaru. Takto připravený vzorek je vložen do kovové formy tak, že roztavený kov přitéká na spodní část vzorku. Po zalití kovem se prstenec uvolní a směs se rozpadá. Podle míry rozpadnutí lze usuzovat míru plynotvornosti. Výsledný objem se stanovuje z empirických vztahů.
4. Metoda podle Piščeva – plyny jsou odváděny ze vzorku umístěného ve středu kovové formy pomocí trubky, která je napojena na měřicí přístroj tlaku a objemu. Hodnoty jsou odečítány v předem stanovených časových intervalech. Vzorek je možno zalévat dvěma způsoby. Jeden způsob je vhodný pro směsi, které budou při výrobě odlitku zalité pouze z jedné strany, proto je také vzorek zalit jen z části. Druhý způsob je vhodný pro jádra s velkým tepelným namáháním. V tomto případě je vzorek zaléván celý.
5. Ponorná zkouška – jde o metodu, při které se měří tlak plynu v jádře v závislosti na čase. Výsledná závislost vykazuje dvě maximální hodnoty. První z těchto hodnot vznikne na počátku, kdy se k vytváření plynů z jádrové směsi přidá ještě objem plynů obsažený v pórech formy a prudkým ohřevem zvětšují svůj objem. Vznikající plyny jsou částečně odváděny trubičkou. Zbytek proniká roztaveným kovem. Pára a kondenzující plyny se srážejí v kondenzační zóně, která se v průběhu prohřívání jádra posouvá směrem k jeho středu. Ke druhé maximální hodnotě dojde, až se kondenzační zóna přemístí do středu vzorku k trubičce, kde se kondenzát vypaří. Na tuto zkoušku je formovací směs připravena podle předem stanovených postupů a směs je slisována s trubičkou přesným tlakem. Pro samotné provedení zkoušky je zhotoveno zvláštní mechanické zařízení, skládající se ze vzduchového válce, ramene a ukazatele přesné polohy. Přívod tlakového vzduchu je škrcen clonou zaručující konstantní rychlost ponořování do hloubky 200 mm. Vzorek je ponořován do taveniny umístěné v kelímku o obsahu 0,0078 m³. Ohřev je prováděn indukčně [2], [96].

5.1.2 Metody měření plynotvornosti nepřímé - laboratorní

Metody nepřímé (laboratorní) jsou založeny na sledování plynotvornosti malého množství formovací nebo jádrové směsi, kterou zahříváme v peci. K tomuto účelu slouží např. Marsova pec, do které prostřednictvím porcelánové lodičky vkládáme navážku malého množství sledované směsi. Zde je směs zahřívána a vzniklé plyny proudí chladičem do různě sestaveného eudiometru (skleněná kalibrovaná trubice pro měření objemu plynů), viz schéma na obr. 5-1.



1 - žáruvzdorná trubice se vzorkem směsi; 2 - Marsova pec; 3 - chladič; 4 - eudioměr

Obr. 5-1 Schéma přístroje na stanovení plynotvornosti formovací směsi [2]

Tohoto a podobného pokusného uspořádání použili ve 30. a 40. letech minulého století např. K. GRASSMANN, W. H. DIETERT, A. A. NIZOVCEV a jiní, jak uvádí PETRŽALA [2]. Určitá chyba nastávala tím, že z měření se vyloučily kondenzáty, které v kritickém okamžiku působí v jádru jako plyny. Výsledky těchto metod byly relativní, neboť nebylo jasné, zda vyjadřují skutečné poměry ve formě nebo jádru.

Od této doby došlo ke zpřesnění nepřímých metod zjišťování plynotvornosti. Také byla zkonstruována a jsou profesně vyráběna zařízení k měření plynotvornosti. Postupně byly vyvinuty metody, při kterých zahříváme rozmělněnou navážku zkoumané směsi v peci na zvolenou teplotu (600 až 1300 °C). K měření se používá tzv. vlastní atmosféry (měřicí aparatura je vyplněna plyny, které vznikají při měření), popř. je možné do měřicího zařízení přivést netečný plyn. Různé druhy atmosfér se používají proto, abychom zaručili stálost případných vlivů a vyloučili možnost hoření za přítomnosti vzdušného kyslíku nebo atmosféry CO₂. K tomu přispěla např. firma George Fischer (+GF+) přístrojem PGD (viz obr. 5-2), který je v současné době používán ve velkých slévárnách. Je konstruován pro teplotu ohřevu vzorku 800 až 1000 °C, v atmosféře N₂. Skládá se z pecního prostoru a vstřelovacího zařízení.

Navážka má hmotnost 1 gramu a přístroj má vodní manometr, který sleduje tlak plynů a se vstřelením vzorku do pece i čas [2], [96].



Obr. 5-2 Přístroj PGD +GF+ na stanovení plynotvornosti slévárenských směsí, [81]

Dále se používá např. metoda podle Ornsta, kdy se vzorek vkládá pomocí speciálně upravené lodičky do trubkové elektrické pece vyhřáté na 1000 °C. Přitom se měří tlak pomocí dvou speciálně sestavených manometrů. Po každém měření je zařízení profukováno CO₂.

Dále je to metoda Ströhlein, kdy se vzorek vkládá do Marsovy pece vyhřáté na teplotu 1250 °C. Měří se čas a množství vyvinutého plynu. Množství plynu se odečítá na kalibrované byretě, z níž je kapalina plyny vytlačována do vyrovnávací nádržky. Odečítaný objem nesouhlasí se skutečně uvolněným objemem, protože tlak není konstantní, ale lineárně narůstá s poklesem hladiny. Maximální hodnota plynotvornosti je odečítána při maximální komprimaci. Navážka směsi činí cca 2 g, je tedy nutné pro vyhodnocení přepočítat na 1 g směsi.

Metoda podle SVÚM Brno vychází ze stejného uspořádání měřicího zařízení jako metoda podle Ornsta. Rozdíl spočívá v odečítání maximální hodnoty ne z manometru, ale z reometru, kterým je v zapojení manometr nahrazen. Navážkou je směs o hmotnosti 1 g. Obecně lze konstatovat, že nepřímé metody používají navážky 1 až 5 gramů směsi, která se umístí do porcelánové lodičky nebo lodičky z molybdenového plechu, směs se nepěchuje, naopak, povrch je nakypřený. Pouze ve zvláštních případech se používají speciální vzorky z pěchované směsi. Ohřev se provádí v elektrické peci při teplotě 800 až 1300 °C pomocí tepelného záření. Výkon tepelného zdroje je stálý během celého pokusu. Metody měření množství uvolněného plynu jsou závislé na tlaku nebo na objemu. U této metody lze plynotvornost určit buď měřením tlaku vznikajících plynů v závislosti na čase nebo měřením objemu vznikajících plynů též v závislosti na čase. Objem uvolněných plynů není časově závislý. Pro jakostní charakteristiky se používá fyzikálně definovaných podmínek prohřívání směsi v lici formě a kinetiky

plynotvornosti. Tak, jako metody přímé, také nepřímé metody se vyznačují následujícími nedostatky. Měření nepostihuje vliv relativní tloušťky stěny odlitku ani vliv tloušťky stěny jádra obtečeného kovem. Vzorek je prohříván při konstantní teplotě, přičemž v praktických podmínkách je teplota prohřátí jádra různá. Žádné z těchto měření nemůže ukázat celkový akční tlak plynů z jádra v přímé souvislosti se stavem tuhnutí, neboli nepostihuje skutečné tepelné poměry v jádře [96].

5.1.3 Nepřímé experimentální měření plynotvornosti a charakteristika zařízení pro měření plynotvornosti na KSP TU v Liberci

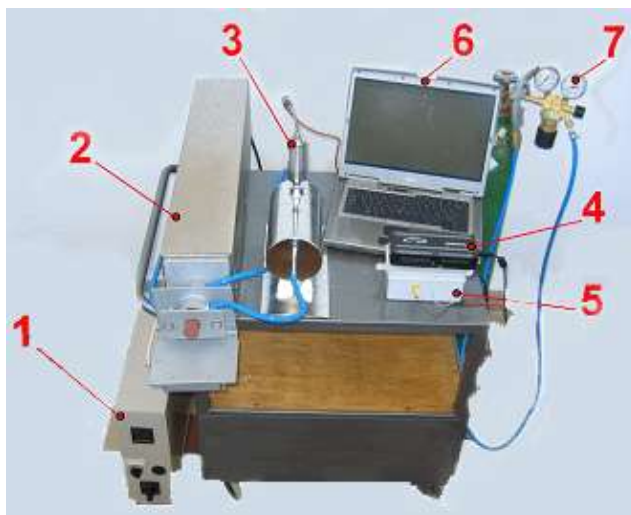
Tato část habilitační práce je zaměřena na zjišťování objemu uvolněných plynů z navážky vzorku (nejčastěji 1 [g] během ohřevu) formovací nebo jádrové směsi.

Měření plynotvornosti bylo provedeno na měřicím zařízení, které bylo navrženo a sestrojeno na našem pracovišti - Katedře strojírenské technologie - FS, TU v Liberci.

Měřicí zařízení pro měření plynotvornosti používané na našem pracovišti prošlo již dvacetiletým vývojem. Za tu dobu na zařízení bylo provedeno několik konstrukčních a metodických změn. Funkce navrženého a neustále zdokonalovaného měřicího zařízení byla již ověřena a některé výsledky byly již zpracovány v diplomových pracích BAUEROVÁ [11], NOVÁK [15] a JENČOVSKÝ [16].

Principem je snímání tlaku uvolňujících se plynů spalováním vzorku směsi v elektrické peci. Tato metoda vychází z metodiky měření plynotvornosti na přístroji PGD (švýcarská firma +GF+). Vzorek navážky zkoušené směsi je ohříván sálavým teplem v uzavřeném prostoru pece, který je spojen pouze s měřicí soustavou. Na měřicím zařízení sledujeme tlak uvolňujících se plynů v daném časovém okamžiku. Toto měřicí zařízení pro měření plynotvornosti slévárenských formovacích a jádrových směsí pracuje na principu snímání tlaku uvolňujících se plynů při zahřívání směsí. Skupinové schéma zařízení je uvedeno v příloze č. 7.

Připojený počítač je vybaven jednotkou pro grafickou interpretaci zjištěných závislostí a to konkrétně objemu uvolněných plynů v závislosti na čase, objemu uvolněných plynů v závislosti na teplotě a teploty v peci v závislosti na čase. Pohled na stávající měřicí zařízení plynotvornosti je na obr. 5-3.

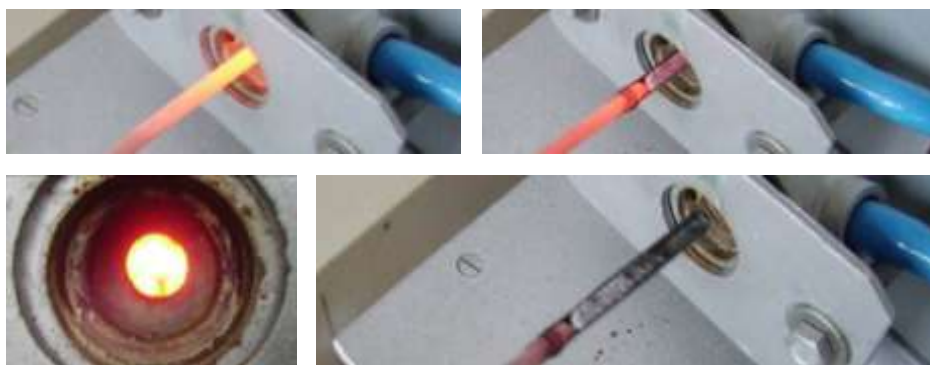


1- regulátor pece; 2 – Marsova pec; 3 – tlakové čidlo; 4 – sběrnice dat; 5 – zdroj napětí pro sběrnici; 6 – PC; 7- tlaková nádoba s plynem (N_2)

Obr. 5-3 Pohled na stávající měřicí zařízení plynatvornosti formovacích a jádrových směsí, včetně označení základních prvků

Výhodou tohoto zařízení je možnost nastavení teplotního režimu (např. $3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) ohřevu prostoru pro vyhřívání prostřednictvím regulátoru ohřevu pece až do teploty $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ s možností vyhodnocení měřené plynatvornosti vzorků jádrových a formovacích směsí v digitální podobě interpretované počítačem. Detailnější popis měřicí sestavy a její nutné kalibrace před samotným měřením je popsán v mé disertační práci MACHUTA, J.: Sledování vlastností formovacích a jádrových směsí během jejich tepelného namáhání, obhájené v roce 2010 na TU v Liberci [96]. Případně pod číslem 20457 zapsaného užitném vzoru v ČR s názvem: Zařízení pro měření plynatosti formovacích a jádrových směsí [97].

Na skupině obrázků - obr. 5-4 je zobrazeno vyjímání tuhých podílů zbytků sledované směsi z měřicího zařízení po měření plynatvornosti.



Obr. 5-4 Pohled na vstupní otvor měřicího zařízení plynatvornosti

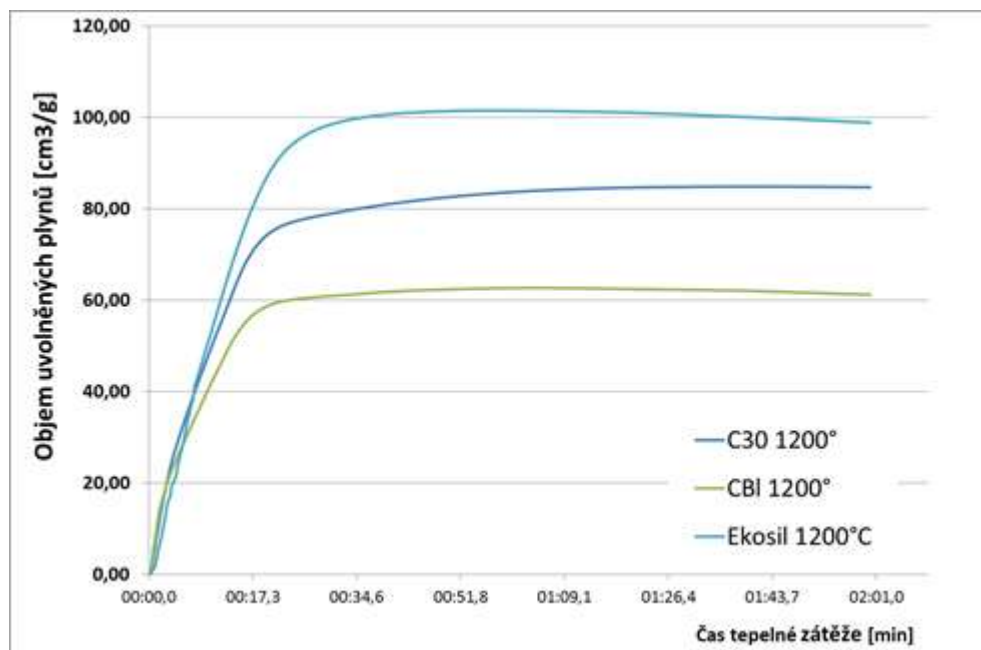
Ke sledování plynatvornosti na našem oddělení KSP TU v Liberci jsou používány směsi o různé konzistenci (od sytké přes kašovitou, až po tuhé kompaktní vzorky, dle její charakteristiky pro následné zpracování). Sledování plynatvornosti vzorků směsí je prováděno na základě experimentů, které lze rozdělit do tří skupin:

- A) Sledování plynatvornosti komplexní směsi „v kašovitém stavu“ před jejím vytvrzením;
- B) Sledování plynatvornosti komplexní směsi po jejím vytvrzení (vzorky již hotových jader před použitím);
- C) Sledování plynatvornosti sytkých komplexních směsí před jejím vytvrzením nebo spěchováním v případě jednotných bentonitových směsí.

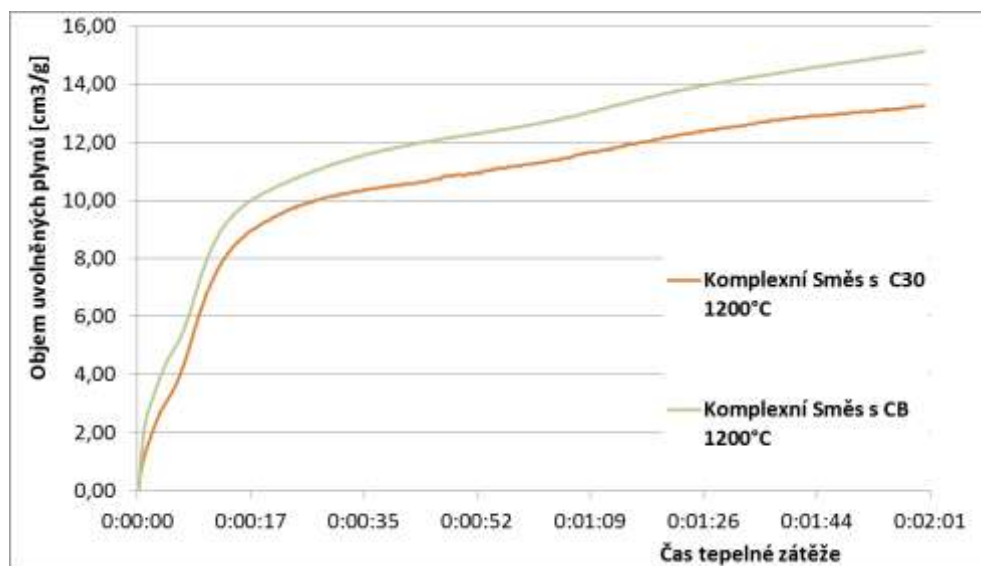
Dlouhá léta je velmi rozšířené použití bentonitových pojiv, ale z hlediska výzkumu jim nebyla dosud věnována taková pozornost jako např. pojivům II. generace. Příčinou byl pravděpodobně fakt, že při nastavení vhodné vlhkosti jednotné bentonitové směsi, pak výstupy z této výroby splňovaly požadavky na kvalitní výrobky. Tyto materiály ale i přesto plyny během tepelné zátěže uvolňují a především např. s nevhodně zvoleným materiálem použitých jader a při velké tvarové složitosti odlitků mohou způsobit vady na odlitcích.

Následující experimentálně změřené závislosti zobrazují výsledky měření plynatvornosti pro různé typy slévárenských materiálů za teplot 800, 1000 a 1200°C.

Na obr. 5-5 je uveden průběh závislosti objemu vyvinutých plynů na čase při 1200°C pro běžně používané bentonitové materiály použité ne jako komplexní JBS ale je změřeno pouze pojivo pro porovnání významu této složky JBS pro výsledky plynatvornosti (jde o bentonitové směsi označené č. 47-49). Dále pak následují výsledky již pro kompletní formovací a následně také jádrové směsi Cold Box. Na obr. 5-6 je uveden průběh závislosti objemu vyvinutých plynů na čase při 1200°C již pro komplexní bentonitové směsi.



Obr. 5-5 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1200 °C (čistého pojiva C30, CBI a Ekosil bez použitého ostřiva)



Obr. 5-6 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1200 °C (Komplexní směs pojiva C30 (č.47) a CBI (č. 48))

V této práci se zaměřuji především na proměření nepoužívanějších JBS a v následujícím případě je uvedena jednotná bentonitová směs JBS-MJ, č. směsi 45. Směs obsahuje směsný bentonit typ KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K. Tato formovací směs se používá pro lití tvárných a šedých litin. Tato směs je porovnána se vzorky jádra typu Cold – Box (č. směsi 46). Jádro je tvořeno pomocí technologie ColdBox s použitím slévárenského písku z Provoďína PR-33 (v kapitole 5.3. je přiložen výsledek granulometrického rozboru), pryskyřičnou komponentou

ASCOCURE 388 a aktivátorem ASCOCURE 688. Pro výrobu směsi tohoto jádra byl užitý poměr 0,55% pryskyřice a 0,72% aktivátoru. Tento pojivový systém je vhodný pro litinu i ocel a vykazuje následující vlastnosti: Vyjímací pevnost ≥ 220 [N/mm²], konečná pevnost ≥ 540 [N/mm²].

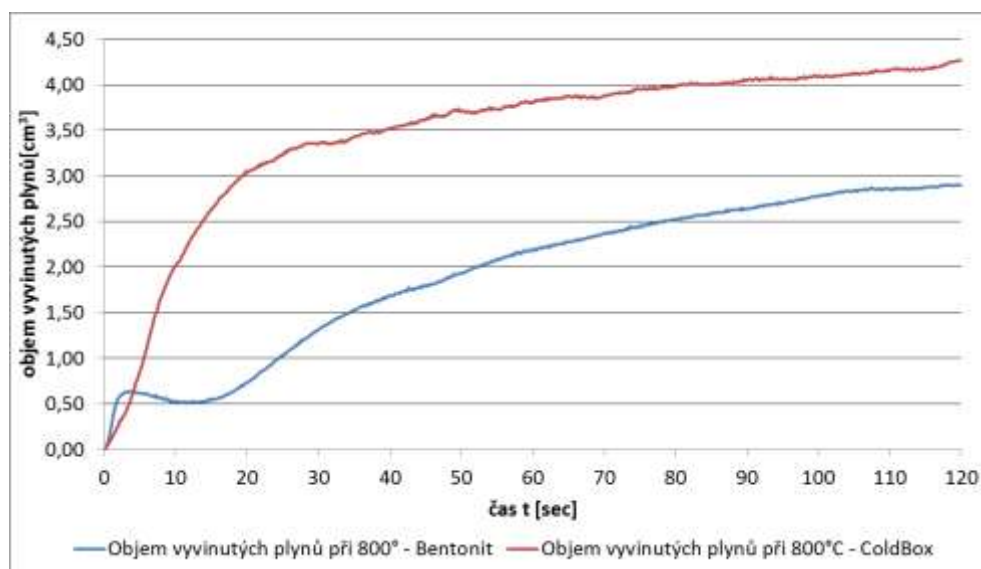
Vzorky byly měřeny pro tři teploty, a to pro 800°C, 1000°C a 1200°C po dobu tepelné zátěže 120 s. Měření pro každou teplotu bylo provedeno 10 x kvůli eliminaci chyb. To znamená, že bylo sumou pouze pro tyto 2 vzorky provedeno přes 60 úspěšných experimentů vyjma kalibrací. V této části práce budou uvedeny pouze hodnoty po statistickém vyhodnocení. Vzhledem k velkému množství nasbíraných dat (přes 1000 záznamů na 1 měření) jsou uvedené hodnoty pouze pro vybrané časy.

V následující tabulce 5-1 jsou uvedeny vybrané hodnoty plynotvornosti pro měření při 800°C. Jsou zde uvedeny hodnoty pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

Tabulka 5-1 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 800°C

čas t [sec]	Bentonit tlak P [Pa]	ColdBox tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm ³ /g]	ColdBox objem V [cm ³ /g]
30,0	62,212	159,315	1,306	3,345
60,0	104,147	181,182	2,187	3,804
90,0	125,620	193,013	2,638	4,053
120,0	137,856	203,240	2,895	4,267

Na obr. 5-7 je zobrazen průběh závislosti objemu vyvinutých plynů na čase při 800°C.



Obr. 5-7 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 800°C (Bentonit JBS- MJ č. 45, Cold- Box ASCOCURE 388 č.46)

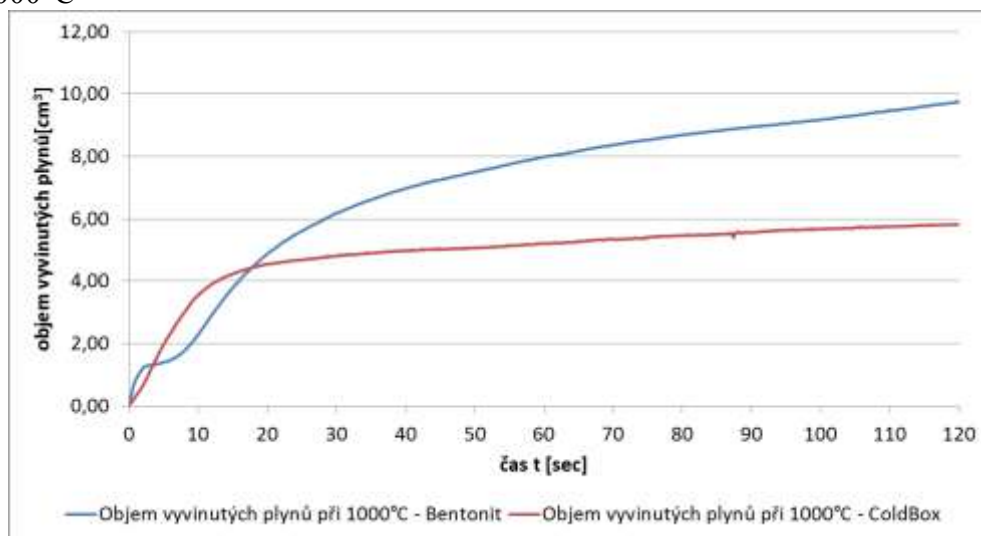
V následující tabulce 5-2 jsou uvedeny vybrané hodnoty pro měření při 1000°C.

Jsou zde uvedeny hodnoty pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

Tabulka 5-2 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 1000°C

čas t [sec]	Bentonit tlak P [Pa]	ColdBox tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm ³ /g]	ColdBox objem V [cm ³ /g]
30,0	294,492	228,528	6,183	4,798
60,0	380,907	247,876	7,998	5,205
90,0	426,205	264,895	8,949	5,562
120,0	464,237	277,076	9,748	5,818

Na obr. 5-8 je k vidění grafické znázornění průběhu objemu vyvinutých plynů na čase při 1000°C



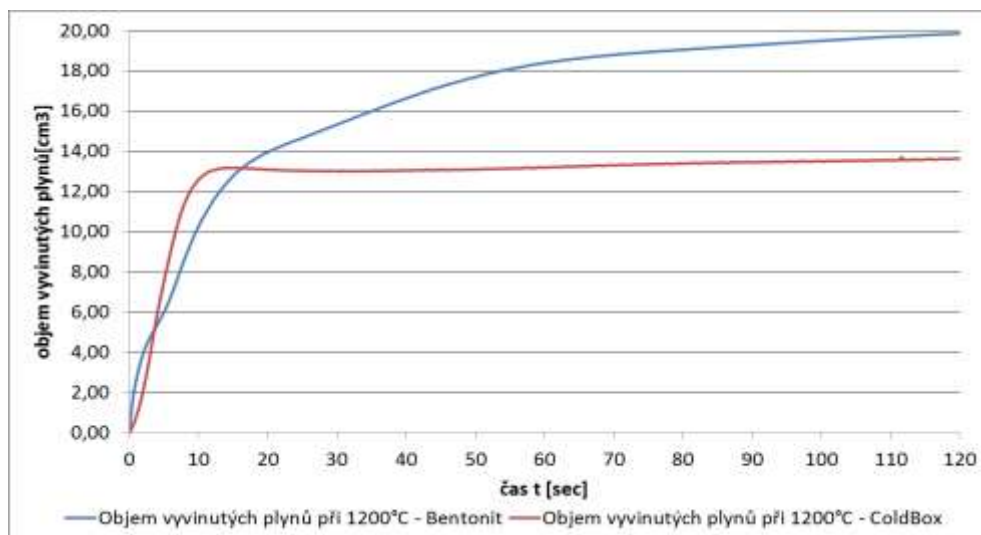
Obr. 5-8 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1000 °C (Bentonit JBS- MJ č. 45, Cold- Box ASCOCURE 388 č.46)

V následující tabulce 5-3 jsou uvedeny vybrané hodnoty pro měření při 1200°C. Jsou zde uvedeny výsledky pro okamžitý tlak i objem vyvinutých plynů.

Tabulka 5-3 Vybrané vyhodnocené hodnoty pro měření při 1200°C

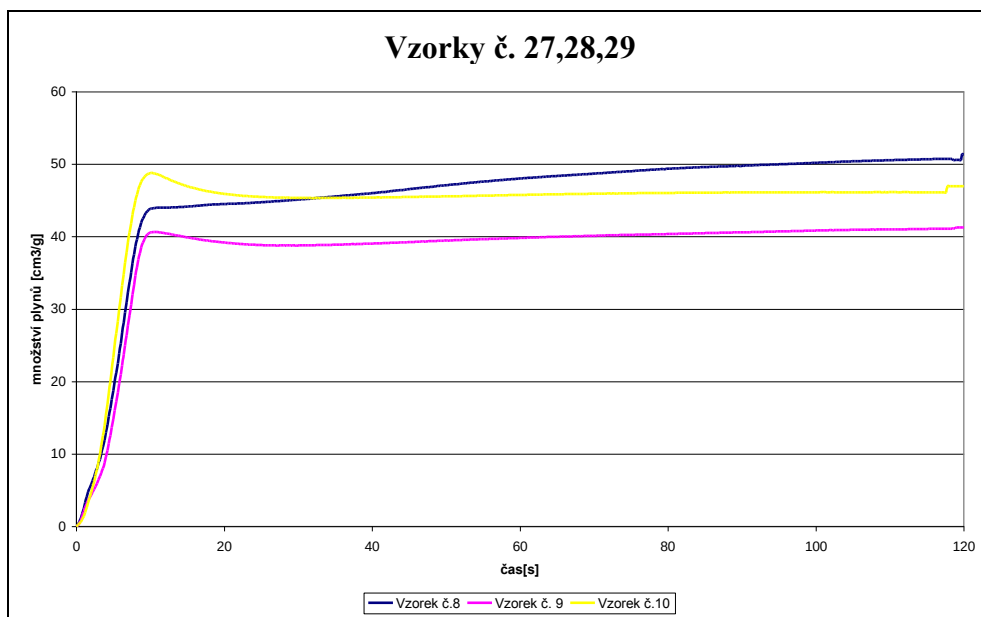
čas t [sec]	Bentonit tlak P [Pa]	ColdBox tlak P [Pa]	Bentonit objem V [cm ³ /g]	ColdBox objem V [cm ³ /g]
30,0	730,133	619,913	15,331	13,016
60,0	876,257	628,412	18,399	13,195
90,0	918,306	640,689	19,282	13,452
120,0	945,873	649,184	19,860	13,631

Na obr. 5-9 je k vidění grafické znázornění průběhu objemu vyvinutých plynů na čase při 1200°C.



Obr. 5-9 Graf průběhu objemu vyvinutých plynů při 1200 °C (Bentonit JBS- MJ č. 45, Cold- Box ASCOCURE 388 č.46)

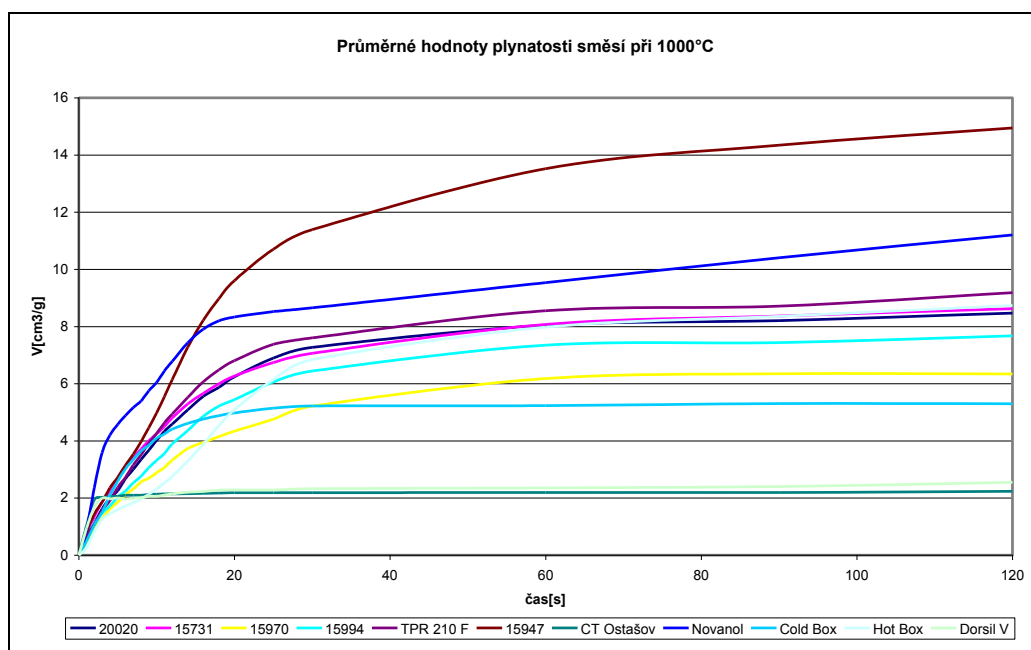
Kromě běžně používaných jednotných bentonitových směsí se používají především ve speciálních slévárnách uměleckého lití různé směsi modelové a výplňové, které z hlediska plynotvornosti vykazují velký skok v porovnání s dnes běžnějšími jednotnými bentonitovými směsmi. Výsledky jejich měření jsou uvedeny na obr. 5-10.



Obr. 5-10 Průměrné hodnoty množství uvolněných plynů v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směsi č. 27, 28, 29)

Dále následují naměřené výsledky pro porovnání plynotvornosti dalších používaných formovacích a jádrových materiálů viz obr. 5-11. Detailní popis číselného značení všech vzorků je z důvodu objemu dat uveden v příloze č. 8.

Všeobecně výsledky plynotvornosti potvrzují nižší hodnoty u směsí s vodním sklem, které je anorganického původu. Směsi s vodním sklem by byly z tohoto pohledu pro výrobu jader příznivější, avšak k jejich menší použitelnosti přispívá velká zbytková pevnost po odlití. Vodní sklo, použité v této práci, je označováno obchodním názvem Dorsil V. Zjištěné hodnoty plynotvornosti vytvrzených jader s pojivem Dorsil V činily ve 120 s po zahřívání při teplotě 800 °C 3,06 cm³.g⁻¹, při 1000 °C 2,55 cm³.g⁻¹ a při 1200 °C 2,48 cm³.g⁻¹. Hodnoty plynotvornosti vytvrzeného jádra označeného CT (Slévárna Ostašov a.s.) jsou ještě nižší a vykazují v časovém okamžiku 120 s po zahřátí plynotvornost při teplotě 800 °C 2,13 cm³.g⁻¹, při 1000 °C 2,23 cm³.g⁻¹ a při 1200 °C 1,73 cm³.g⁻¹.



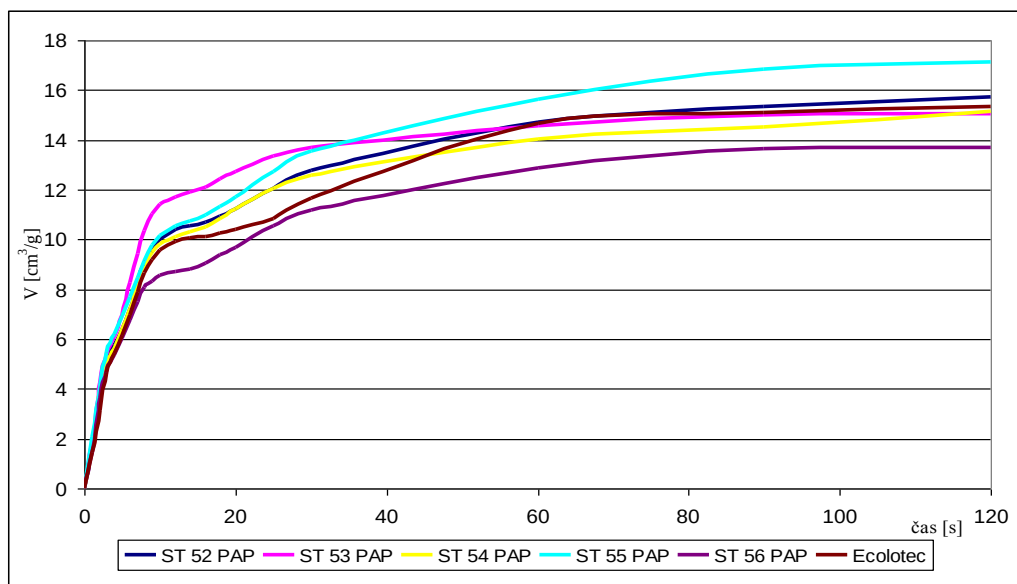
Obr. 5-11 Průměrné hodnoty plynotvornosti všech měřených směsí v závislosti na čase při teplotě 1000 °C, (směs č.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10 a 11)

Vyšší hodnoty plynotvornosti vykazují všeobecně pryskyřice, které jsou látky organického původu. Dále při posuzování např. plynotvornosti komplexních obalovaných směsí v porovnání s jejich velikostními frakcemi vychází měřením najevo předpoklady, že menší frakce, které ve stejném objemu mají větší celkový povrch, vykazují větší plynotvornost. To je způsobeno pravděpodobně tím, že ostřivo je díky většímu povrchu obaleno větším množstvím pojiva, které se hlavním dílem podílí na plynotvornosti směsi.

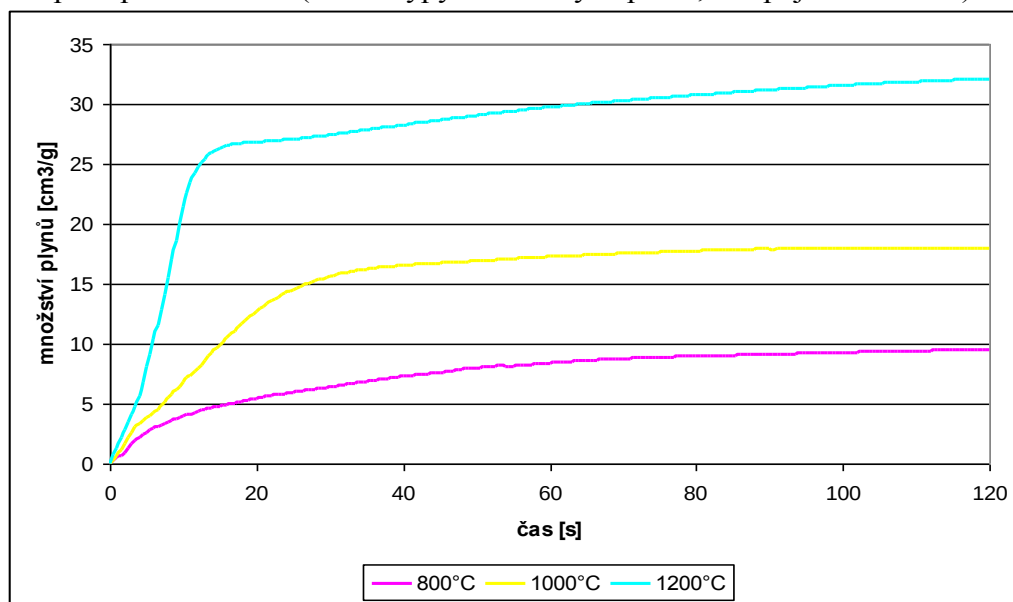
Na obr. 5-12 jsou uvedeny výsledky průměrných hodnot plynotvornosti pro komplexní směsi které obsahují střelečské ostřivo různé zrnitosti v kombinaci se 3%

použitého pojiva Novanol. Pro porovnání je vložen změřený výsledek jiného druhu pojiva a to konkrétně 2% koncentrace pojiva Ecolotec.

Na Obr. 5-13 jsou uvedeny výsledky průměrných hodnot plynovornosti pro komplexní směsi které obsahují střelečské ostřívo ST-56 v kombinaci s fenolovou pryskyřicí použitou jako pojivo.



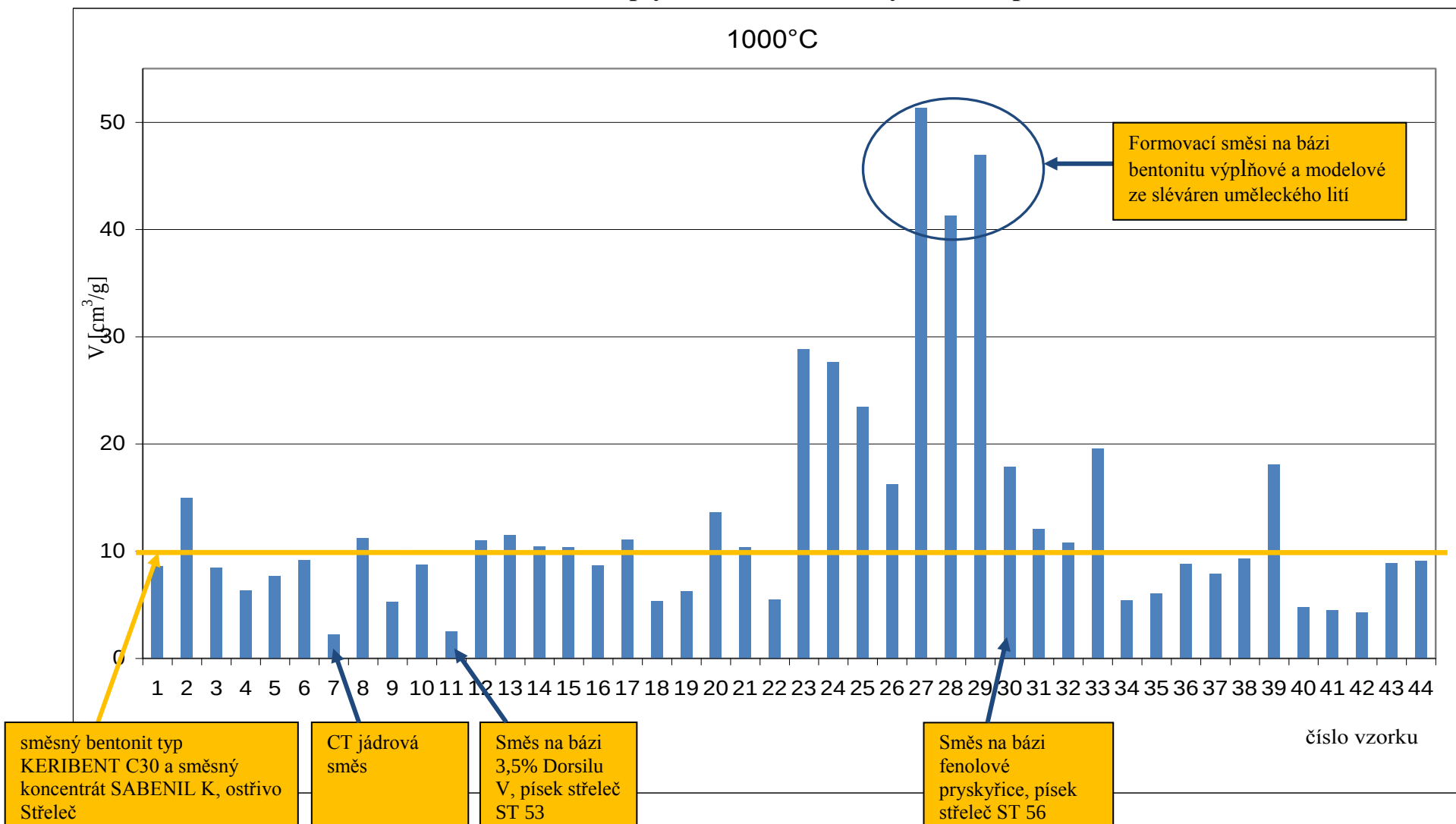
Obr. 5-12 Průměrné hodnoty plynovornosti směsí č. 12 až č.17 v závislosti na čase při teplotě 1200 °C(různé typy střelečských písků, 3% pojiva Novanol)



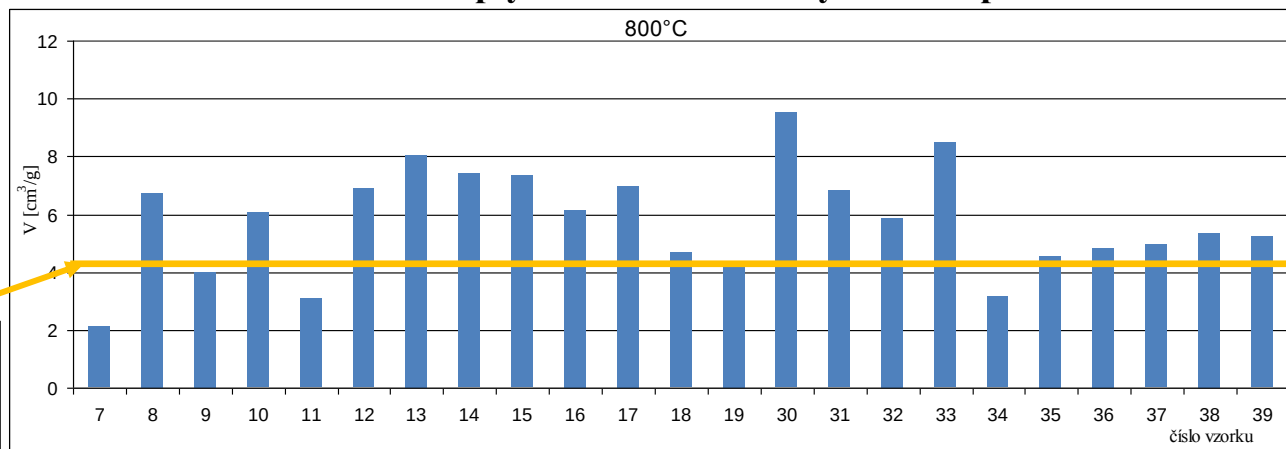
Obr. 5-13 Průměrné hodnoty plynovornosti směsi č. 30 při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Na následujících dvou grafických listech je uveden souhrnný grafický přehled mých experimentálních výsledků měření plynovornosti širokého spektra slévarenských formovacích a jádrových materiálů. Dle značení čísla vzorku je uveden v příloze č. 8 i detailní popis známých parametrů pro každou směs.

Grafické zobrazení plynotvornosti měřených směsí pro 1000 °C

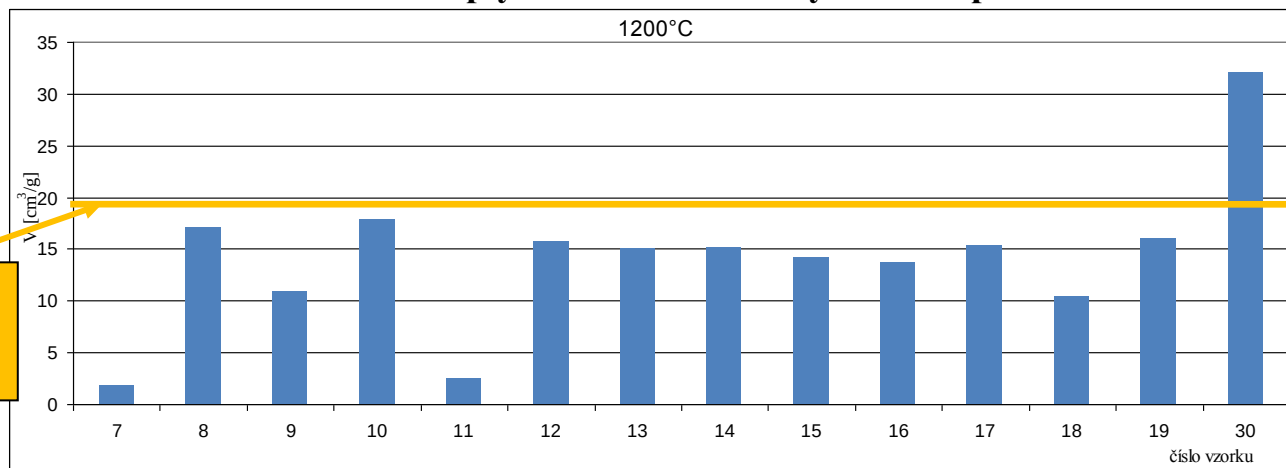


Grafické zobrazení plynotvornosti měřených směsí pro 800 °C



směsný bentonit typ
KERIBENT C30 a směsný
koncentrát SABENIL K, ostřivo
Střeleč

Grafické zobrazení plynotvornosti měřených směsí pro 1200 °C



směsný bentonit typ
KERIBENT C30 a směsný
koncentrát SABENIL K, ostřivo
Střeleč

5.2 Experimentální dilatometrické měření

Dilatometrickým měřením u slévarenských forem a jader se získává průběh závislosti rozměrových změn zkoumaného vzorku v závislosti na teplotě ohřevu (křivka prodloužení - čas). Podle způsobu měření dilatace lze používané metody zařadit do dvou skupin:

- A) absolutní metoda měření dilatace;
- B) relativní metoda měření dilatace.

Absolutní metoda měření dilatace je založena na měření přímého roztažení (popř. smrštění) vzorku v závislosti na teplotě. Tato metoda je velmi přesná, ale časově náročná. Používá se především pro cejchování měřicích zařízení.

Relativní metoda měření dilatace - není založena na přímém měření prodloužení (popř. zkrácení) zkušební tělesa, ale zkušební těleso se porovnává s prodloužením etalonu známé dilatace, která byla zjištěna metodou absolutní.

Pro dilatometrická měření slouží zařízení nazvané dilatometr, který umožňuje obvykle ohřev a ochlazení zkoumaného vzorku určitou rychlostí a bývá vybaven registračním zařízením, na kterém se zaznamenávají sledované závislosti prodloužení na teplotě. Dilatometry jsou různé konstrukce, podle zkoumaného vzorku. Základní částí dilatometru bývá elektrická pícka speciální konstrukce, do které se vkládá speciálně upravené těleso, nejčastěji zhotovené z křemenného skla. Na toto těleso se ukládá zkušební vzorek předem stanovených rozměrů. Těleso z křemenného skla bývá nejčastěji propojeno se snímačem délkové změny (např. indukčním snímačem).

Zařízení, které se používá k měření dilatačních změn u slévarenských směsí na KSP TU v Liberci dnes, je inovované a prošlo mnoha úpravami a změnami. Detailní popis tohoto zařízení je v kapitole 5.2.1. této habilitační práce.

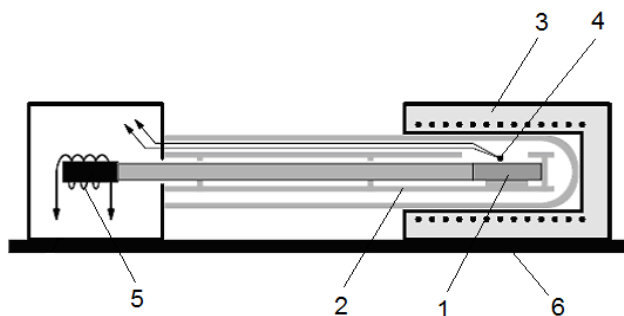
5.2.1 Charakteristika současného zařízení pro měření dilatace slévarenských směsí na KSP TU v Liberci

Tato část habilitační práce je zaměřena na druhý fenomén, který při tepelné zátěži formovacích a jádrových směsí vzniká, tj. teplotní dilatace kompaktně připravených výše uvedených směsí.

Podobně, jako zařízení pro měření plynotvornosti, také zařízení pro měření dilatace, bylo vyvinuto na našem pracovišti cca před 30 lety a postupně procházelo

inovacemi. Byla zdokonalována jak část mechanická, tak část registrační. Na tomto měřicím zařízení bylo prováděno několik experimentů, které jsou součástí výzkumných a diplomových prací, jako např. diplomová práce TIETLA [84] z roku 1981.

Aktuální zařízení používané ke sledování dilatačních změn vzorku směsi na KSP TU v Liberci je složeno z indukčního snímače, který převádí změnu velikosti délky na elektrické napětí, jež je zaznamenáváno pomocí softwarového vybavení do PC. Na obrázku 5-14 je schéma zařízení pro měření dilatačních změn formovacích a jádrových směsí. Lze je samozřejmě použít pro jakékoliv jiné kompaktní vzorky např. slitin kovů. Detailněji jsou tyto starší typy našich dilatačních zařízení a samozřejmě i aktuální používané zařízení popsány v mé disertační práci MACHUTA [96]. Obr. 5-15 zobrazuje pro představu sadu vyrobených vzorků tvaru válečku určenou pro měření dilatace.



1 - měřený vzorek; 2 - tyč z křemenného skla; 3 - elektrická odporová pec;
4 - termočlánek; 5 - indukční snímač; 6 - rám zařízení.

Obr. 5-14 Schéma zařízení pro měření dilatačních změn

Kalibrace zařízení pro měření dilatace se provádí pomocí mikrometrického měřidla. Stanovuje se změna délky v závislosti na změně napětí vzniklého na indukčním snímači. Na základě tohoto experimentu se stanovuje hodnota konstanty pro přepočet elektrického napětí na hodnotu délky. Tato konstanta byla 0,004114. Pomocí této konstanty byly prováděny i přepočty naměřených hodnot dilatace této disertační práce.



Obr. 5-15 Ukázky vyrobených vzorků pro měření dilatace

Možnosti prováděných experimentů můžeme rozdělit do dvou základních skupin, které se liší charakterem ohřevu:

- první skupina - ohřev vzorku směsi $\varnothing 8 \times 50$ mm **tepelným šokem**, kdy teplota vzorku dosahuje až 1000°C .
- druhá skupina - **postupný ohřev** vzorku směsi $\varnothing 8 \times 50$ mm do teploty 1000°C .

Naměřené hodnoty, tj. hodnota dilatace, teplota T_1 (teplota v okolí vzorku) a teplota T_2 (teplota vzorku) jsou během měření zaznamenávány prostřednictvím programu DaqVIEW. Naměřené výsledky napětí jsou přepočítávány pomocí kalibrační konstanty na délkovou hodnotu, tj. na mikrometry [μm]. Dilatace je vždy převáděna na procentuální hodnotu, protože vyrobit vzorky naprosto stejných rozměrů z těchto slévarenských materiálů je téměř nemožné.

V tabulce 5-4 je pro ilustraci ukázka vybraných naměřených a vypočítaných hodnot (měření při šokovém charakteru ohřevu směsi ostřivo ST 52 PAP a pojivem byl 3 % Novanolu). Vztahy pro výpočet hodnot veličin (ΔU , δ a procentuální vyjádření dilatace) jsou uvedeny v příloze č. 10.

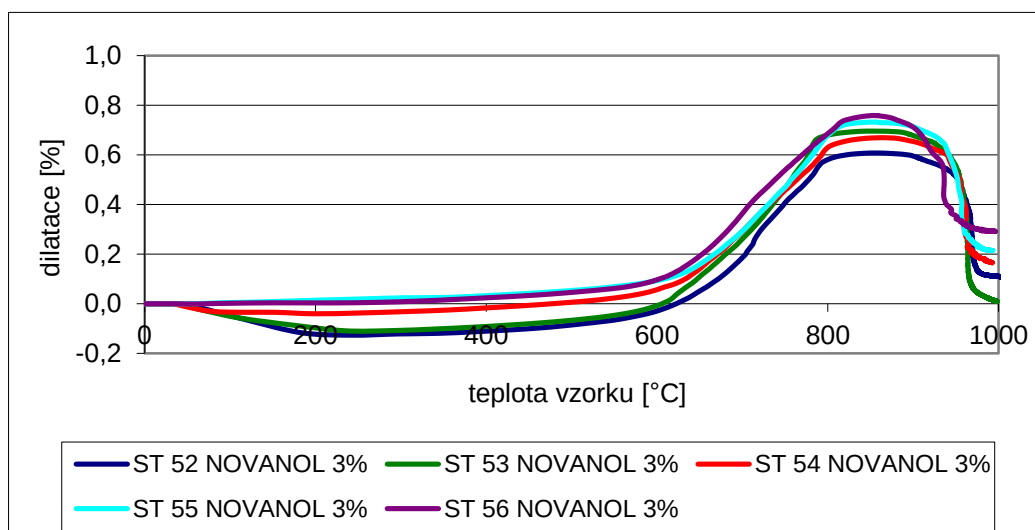
Tabulka 5-4 Ukázka vybraných naměřených a vypočítaných hodnot získaných z jednoho měření dilatačních změn

Měření dilatace směsi (ST 52 PAP a 3% pojiva Novanolu) ohřev šokem						
Čas měření [s]	Naměřené hodnoty			Vypočítané hodnoty		
	U [V]	T_1 [$^\circ\text{C}$]	T_2 [$^\circ\text{C}$]	ΔU [V]	Δ [μm]	% hodnota
2	4,83684	44,01321	36,58115	0,00010	0,02382	0,00005
2,5	4,87509	80,88483	74,22105	-0,03815	-9,27443	-0,01839
3	4,97415	188,37600	136,74160	-0,13721	-33,35148	-0,06615
3,5	5,19345	307,11560	198,22880	-0,35651	-86,65751	-0,17187
4	5,19967	417,44100	254,95310	-0,36273	-88,17015	-0,17487
4,5	5,18877	508,22640	307,08610	-0,35184	-85,52163	-0,16962
5	5,17274	581,45730	354,59860	-0,33580	-81,62445	-0,16189
5,5	5,15606	639,17900	397,20050	-0,31912	-77,57000	-0,15385
6	5,13917	683,79720	434,78980	-0,30224	-73,46524	-0,14571
6,5	5,12157	717,96820	467,04240	-0,28463	-69,18546	-0,13722

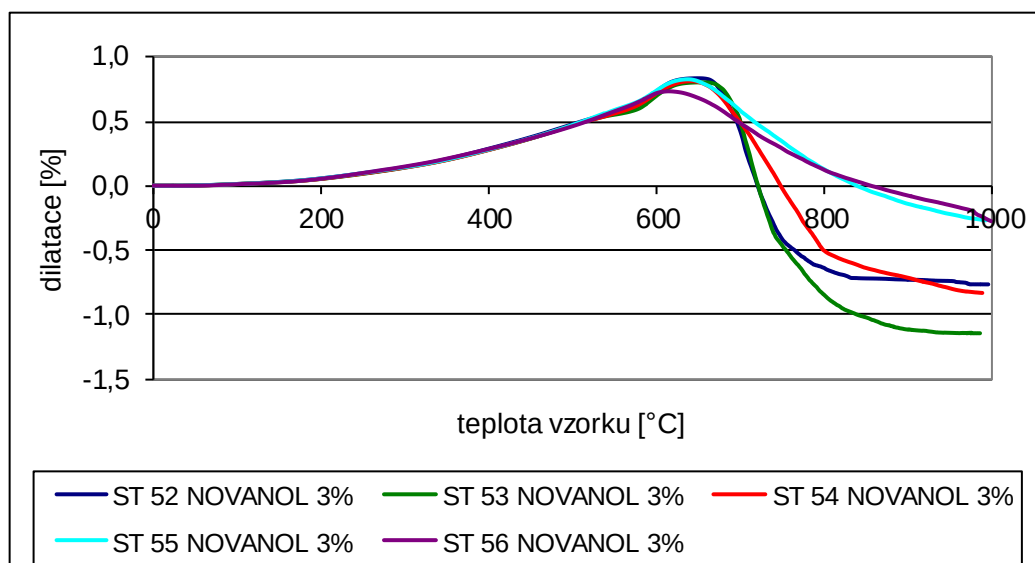
Poznámka: Popis jednotlivých sloupců tabulky čas [s] - daný okamžik záznamu naměřených hodnot a U[V] - naměřená hodnota napětí, která odpovídá změně rozměru vzorku; T_1 [$^\circ\text{C}$] - teplota v okolí vzorku; T_2 [$^\circ\text{C}$] - teplota vzorku.

Na základě měření vzniknou grafické závislosti hodnot dilatace jádrových směsí různých typů střelečských písků v kombinaci s 3% pojiva Novanol viz obr. 5-16 při šokovém ohřevu, který nejvěrněji simuluje proces reálného lití a na obr. 5-17 je

zobrazen postupný ohřev pro stejné materiály, který je zase výhodnější při sledování materiálových tepelně fyzikálních veličin potřebných např. pro potřeby simulací slévárenských procesů.



Obr. 5-16 Grafické závislosti průměrných hodnot dilatace na teplotě vzorků sledovaných směsí při jejich ohřevu šokem, teplota 1000 °C



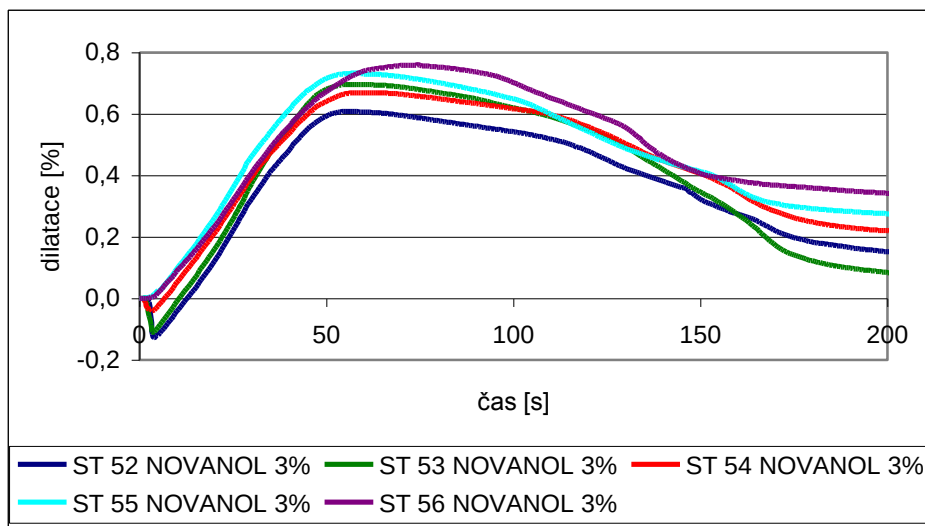
Obr. 5-17 Grafické závislosti průměrných hodnot dilatace na teplotě vzorků sledovaných směsí při postupném ohřevu na teplotu 1000 °C

Obr. 5-16 ukazuje závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na teplotě 1000 °C. Největší smrštění je u vzorků (směs ostřívo ST 52 PAP a pojivo 3 % Novanol, směs č. I), naopak nejmenší smrštění vykazuje směs (ostřívo ST 54 PAP a pojivo 3 % Novanol, směs č. III). Smrštění probíhalo v intervalu teplot 50 až 600 °C. Z naměřených průběhů (viz obr. 5-16) je zřejmé, že přeměna β křemene v α

křemen je posunuta do oblasti vyšších teplot a to asi o 50 °C. Největší dilatace byla naměřena u skupiny vzorků č. V (směs ostřivo ST 56 PAP a pojivo 3 % Novanol), a nejmenší dilataci vykazovala skupina vzorků č. I (směs ostřivo ST 52 PAP a pojivo 3 % Novanol). Z průběhů je dále patrné neshodné ukončení dilatace. Dilatace každého vzorku se zastavila na různé velikosti konstantního průběhu, lze předpokládat, že to mohlo být způsobeno v důsledku zborcení vzorku.

Obr. 5-17 vykazuje závislost průměrných hodnot dilatace na teplotě vzorku při postupném ohřevu vzorků na teplotu 1000 °C. U postupného ohřevu nedocházelo k žádnému smrštění. To mohlo být příčinou rovnoměrného ohřevu vzorku. Je zde patrná změna křemene β v křemen α . Křivky všech skupin vzorků (č. I až č. V) mají velmi podobný průběh časové závislosti dilatace. Největší dilatace se projevila u skupiny vzorků I (směsi ostřivo ST 52 PAP a 3 % Novanol) a nejmenší dilataci vykazuje skupina vzorků č. V (směs ostřivo 5 ST 56 PAP a pojivo 3 % Novanol). Ustálení dilatace na konstantní teplotu je u každé směsi rozdílné. Toto by mohlo být důsledkem zborcení vzorku.

Z obr. 5-18 je patrná závislost průměrných hodnot dilatací stejných materiálů ale v závislosti na čase při ohřevu vzorků tepelným šokem na teplotu 1000 °C. Tyto závislosti vykazují stejné velikosti dilatací. Jejich průběhy se liší, protože jsou závislé na čase.

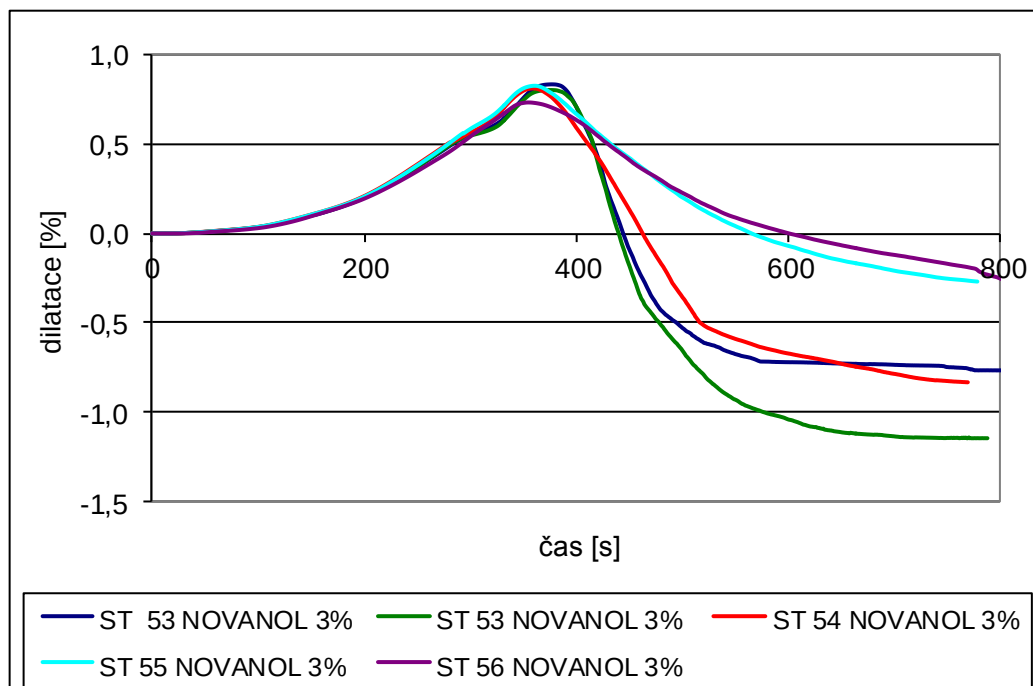


Obr. 5-18 Grafické závislosti průměrných hodnot dilatace na čase při ohřevu vzorku tepelným šokem, teplota 1000 °C

Z této závislosti je patrné, že smrštění vzorku se projevuje pouze na malý časový okamžik a to na cca 15 sekund. Pro porovnání ohřev vzorku, u závislosti průměrných

hodnot dilatace na čase při šokovém ohřevu na 800 °C, trval cca 200 sekund a u závislosti průměrné dilatace na čase při šokovém ohřevu na 1000 °C trval přibližně 500 sekund.

Na obr. 5-19 je uvedena časová závislost průměrných hodnot dilatace na čase při postupném ohřevu vzorku na teplotu 1000 °C. Měření těchto závislostí trvalo přibližně 800 sekund. Průběh závislostí opět koresponduje s průběhem závislostí dilatace na teplotě vzorku.



Obr. 5-19 Grafické závislosti průměrných hodnot dilatace na čase při postupném ohřevu vzorku na teplotu 1000 °C

Součástí vyhodnocení získaných výsledků měření dilatací vybraných typů směsí může být zajímavé, a to především pro potřeby vstupních dat fyzikálně-teplotních veličin simulačních výpočtů, i zjištění hodnot jejich součinitele teplotní roztažnosti v různých teplotních intervalech. Tyto výsledky následně používáme jako vstupní data pro potřeby simulačního programu Magma 5, který aktuálně využíváme na našem pracovišti KSP TU v Liberci. Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti jsou následně po získání výsledků dilatace pro jednotlivé materiály stanoveny dle vztahu:

$$\alpha = \frac{\delta}{l_0(T - T_0)}, \quad (5.1)$$

Kde značí: α - součinitele teplotní roztažnosti; δ - dilataci vzorku po ohřevu; l_0 - počáteční délku vzorku; T - teplotu při dané dilataci; T_0 - předchozí teplotu intervalu.

Ukázka výpočtu součinitele teplotní dilatace je na základě zjištěných hodnot dilatace na teplotě u směsi ST 52 PAP 3 % NOVANOLU při šokovém charakteru ohřevu na teplotu 800 °C. V tabulce 5-5 jsou zaznamenány hodnoty teploty příslušného vzorku ST 52 PAP 3% Novanolu a jim odpovídající hodnoty dilatace a hodnoty součinitele teplotní roztažnosti α [K⁻¹].

Tabulka 5-5 Hodnoty teplot T , dilatace a vypočítané příslušné hodnoty součinitele teplotní roztažnosti, ST 52 PAP 3 % NOVANOLU (ohřev šokem na teplotu 800 °C)

Teplota T [°C]	Hodnota dilatace δ [μm]	Absolutní hodnota dilatace δ [μm]	Hodnota dilatace [mm]	Vypočítaná hodnota součinitele teplotní dilatace α [K ⁻¹]
30,76782	-30,18094	30,18094	0,030181	$9,1 \cdot 10^{-6}$
96,32027	-54,70185	54,70185	0,054702	$9,8 \cdot 10^{-6}$
207,53350	-54,76062	54,76062	0,054761	$12,6 \cdot 10^{-6}$
293,85296	-45,68614	45,68614	0,045686	$8,5 \cdot 10^{-6}$
401,14642	-15,67355	15,67355	0,015674	$3,1 \cdot 10^{-6}$

V tabulkách 5-6 a 5-7 jsou dále uvedeny vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro směsi, ST 52 PAP a pro sádrovou formu výrobce HET. Součinitel teplotní roztažnosti byl vypočítán z průměrných hodnot naměřených dilatací. Výpočet byl proveden pro teplotní interval od pokojové teploty 20 °C do 100 °C a dále pro interval teplot 100 °C až 200 °C a následovně pro $\Delta T = 100$ °C, tj. $(T - T_0)$ ve vztahu (5.1). Pro ostatní sledované vzorky je výpočet možno provést analogicky.

Tabulka 5-6 Vypočítané součinitele teplotní roztažnosti pro směs č. I (ST 52 PAP)

Vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro směs č. I. (ST 52 PAP)		
Ohřev šokem na 800 °C	Ohřev šokem na 1000 °C	Postupný ohřev na 1000 °C
Hodnoty vypočítaného součinitele teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]		
$9,1 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
$9,8 \cdot 10^{-6}$	$18,0 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$
$12,6 \cdot 10^{-6}$	$10,9 \cdot 10^{-6}$	$14,5 \cdot 10^{-6}$
$8,5 \cdot 10^{-6}$	$11,9 \cdot 10^{-6}$	$28,6 \cdot 10^{-6}$
$3,1 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$47,8 \cdot 10^{-6}$
$17,3 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$73,6 \cdot 10^{-6}$
$52,9 \cdot 10^{-6}$	$19,2 \cdot 10^{-6}$	$43,4 \cdot 10^{-6}$
$16,4 \cdot 10^{-6}$	$58,1 \cdot 10^{-6}$	$63,8 \cdot 10^{-6}$
-	$60,0 \cdot 10^{-6}$	$73,0 \cdot 10^{-6}$
-	$10,8 \cdot 10^{-6}$	$79,8 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 5-7 Vypočítané součinitele teplotní roztažnosti pro směs č.VI (Het-bílá 50 %/50 %)

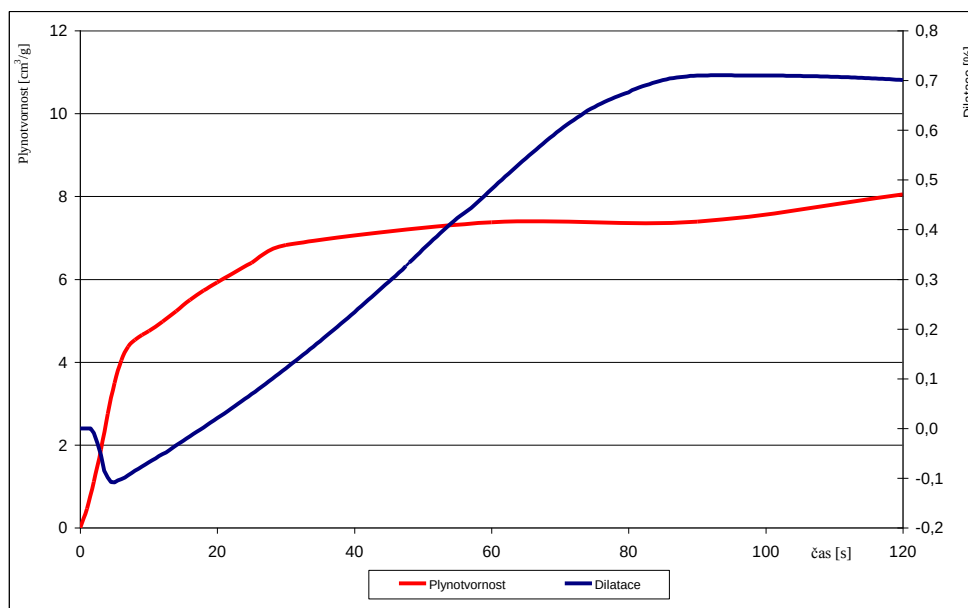
Vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro směs č. VI	
<i>Ohřev šokem na 800 °C</i>	<i>Ohřev šokem na 1000 °C</i>
Hodnoty vypočítaného součinitele teplotní roztažnosti α [K⁻¹]	
5,1.10 ⁻⁸	9,7.10 ⁻⁶
1,5. 10 ⁻⁶	1,1.10 ⁻⁵
2,7.10 ⁻⁶	1,9.10 ⁻⁵
4.10 ⁻⁶	1,2.10 ⁻⁵
2,2.10 ⁻⁶	1,9.10 ⁻⁵

Vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti α [K⁻¹] pak samozřejmě odpovídají naměřeným hodnotám dilatace. Zvyšující se hodnota dilatace je závislá na teplotě ohřevu vzorku. S rostoucí velikostí teploty vzorku stoupá i velikost součinitele teplotní roztažnosti α [K⁻¹].

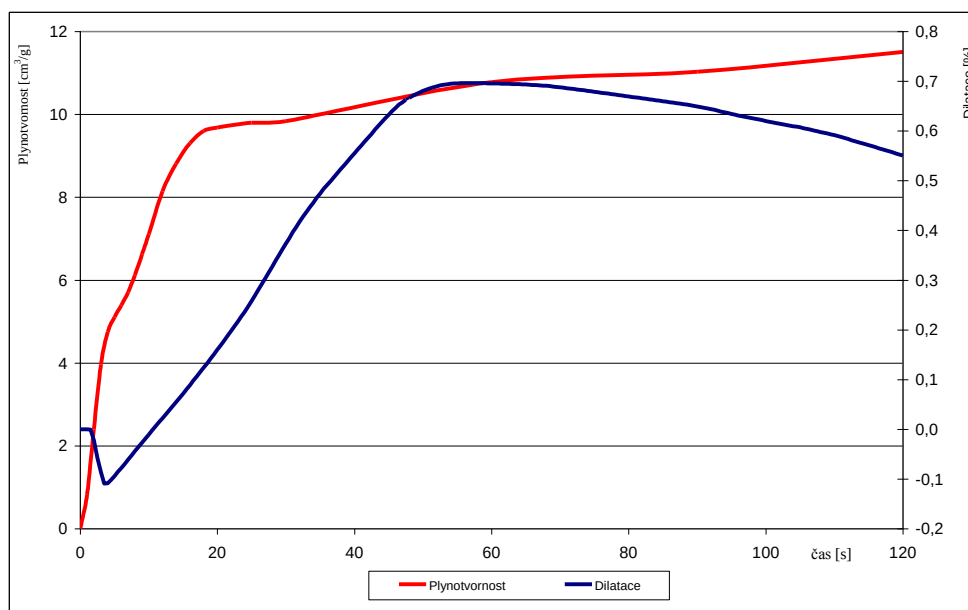
5.2.2 Sledování souvislostí mezi plynotvorností a dilatací u vybraných slévárenských materiálů

Vzhledem k mým rozsáhlým výsledkům naměřených u různých typů slévárenských materiálů jak v oblasti uvolňujících se plynů a zároveň měření dilatačních vlastností jsem mohl díky dodržení všech parametrů měření porovnat potenciální závislosti mezi těmito oběma sledovanými vlastnostmi. Z mého pohledu jde o velmi zajímavý experiment který by mohl do budoucna po měření specifických slévárenských směsí stanovit konkrétní teoretické závislosti pro dané skupiny směsí bez nutnosti měření obou těchto vlastností. Nutno podotknout že obě tyto vlastnosti za stejných podmínek je možno měřit pouze u kompaktních vzorků, tedy např. již vytvrzená jádra, nebo např. sádrové formy, jako jsou měřeny v této kapitole. Vyrobit stabilní vzorek ze směsi jednotného bentonitu by bylo obtížné.

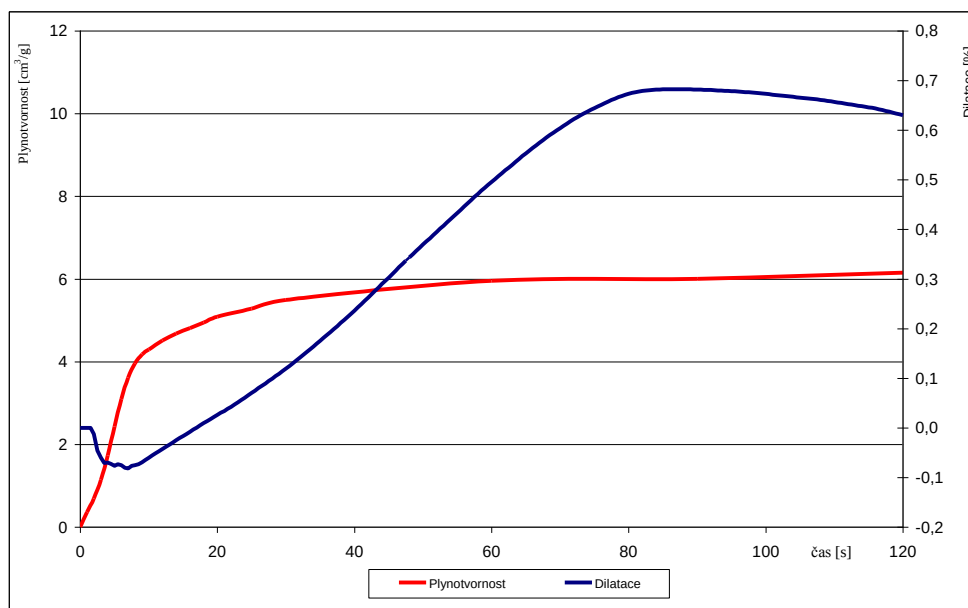
V této kapitole jsou dále uvedeny grafické závislosti výsledků plynotvornosti a dilatace směsí, u kterých tedy bylo z technických důvodů možné proměřit obě tyto slévárenské vlastnosti. Nutno podotknout že důkladná analýza této velmi obsáhlé problematiky bude jedním z mých cílů do budoucna.



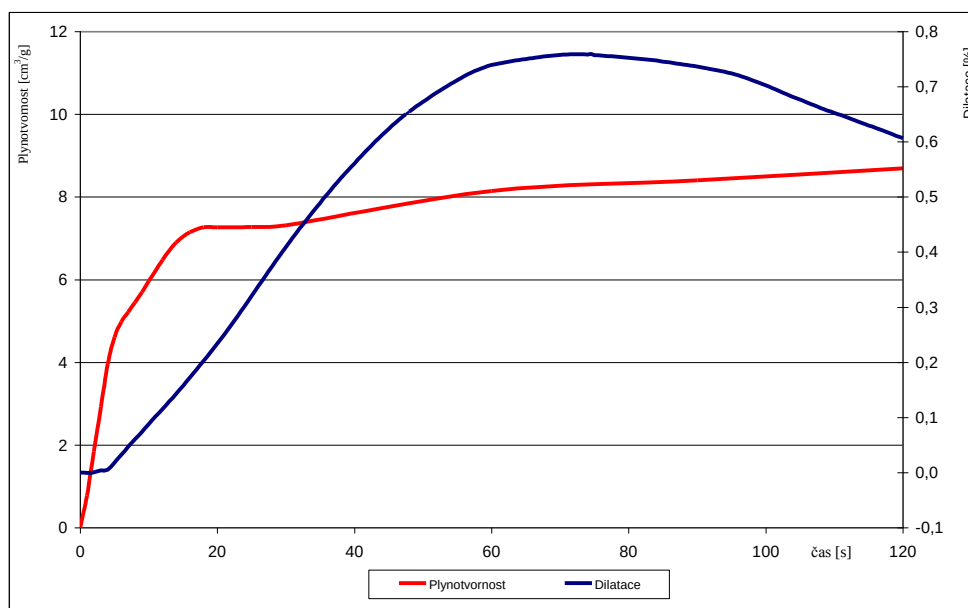
Obr. 5-20 Grafické závislosti průměrných hodnot plynovornosti a dilatace na čase směsi č. II (ST 53 PAP 3% Novanol) při ohřevu vzorků šokem na teplotě 800 °C



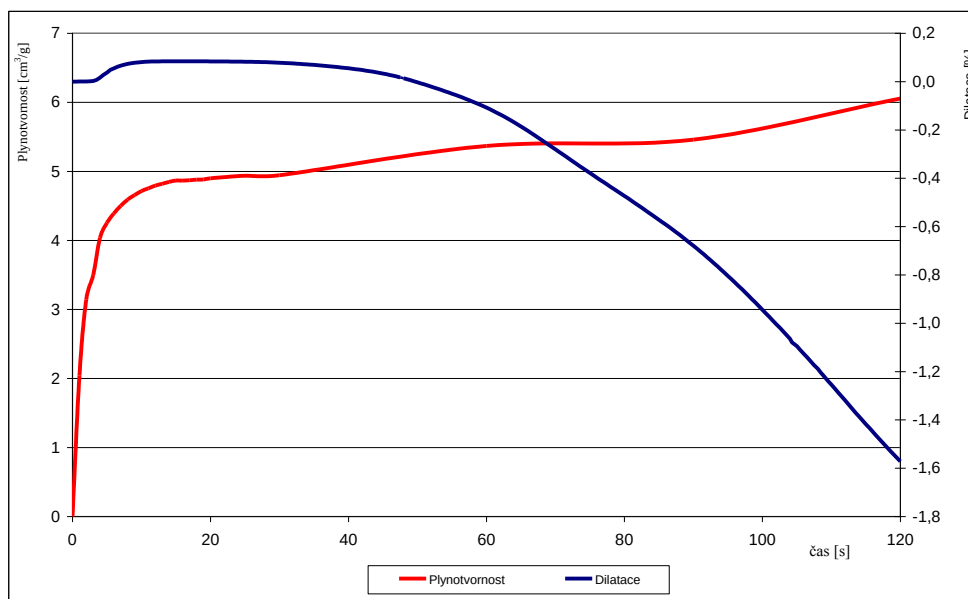
Obr. 5-21 Grafické závislosti průměrných hodnot plynovornosti a dilatace na čase směsi č. II (ST 53 PAP 3 % Novanol) při ohřevu vzorků šokem na teplotě 1000 °C



Obr. 5-22 Grafické závislosti průměrných hodnot plynovornosti a dilatace na čase směsi č. V (ST 56 PAP 3% Novanol) při ohřevu vzorků šokem na teplotě 800 °C



Obr. 5-23 Grafické závislosti průměrných hodnot plynovornosti a dilatace na čase směsi č. V (ST 56 PAP 3 % Novanol) při ohřevu vzorků šokem na teplotě 1000 °C



Obr. 5-24 Grafické závislosti průměrných hodnot plynovornosti a dilatace na čase směsi č. VI (sádra Het- bílá 50 %/50 %) při ohřevu vzorků šokem na teplotě 1000 °C

Do této kapitoly byly vybrány nejzajímavější grafické závislosti obou slévárenských vlastností (sledování plynovornosti a dilatací).

Z obr. 5-20 až 5-24 je zřejmý trend u všech směsí s pojivem Novanol a s ostřivou z naleziště Střeleč (střelečské písky) vykazuje vždy na 800 °C relativní výdrž na rozměru vzorku, tedy na maximální dilataci, která činí u směsí č. IV až 0,75 % při dosažené teplotě 852 °C.

Sledování a porovnání těchto dvou vlastností by mohlo přinést nový pohled na analýzy vad odlitků a vliv na změny případných opatření k jejich eliminaci.

5.3 Výsledky měření technologických a mechanických vlastností použitých slévárenských směsí

Tato kapitola popisuje pro ucelenost výsledné hodnoty experimentálních měření mechanických a technologických vlastností použitých jednotných bentonitových směsí a dalších použitých slévárenských materiálů s ohledem na zkoušky technologických vlastností popsané v kapitole 3. této habilitační práce: Vlastnosti slévárenských formovacích směsí a jejich zkoušení [90], [92].

Ke stanovení pevnosti formovací směsí **JBS ozn. č. směsí 45 , ozn. JBS – MJ** se použil univerzální přístroj LRu polské výroby. Na tomto přístroji se dají měřit

všechny zkoušky pevnosti. Použitá směs **JBS ozn. č. směsi 45 , ozn. JBS – MJ** je tvořená ostřivem Střeleč a jako pojivo byl použit směsný bentonit KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K).

Pevnost v tlaku a ve stříhu byla měřena klasickým způsobem. Před samotným měřením se musely vytvořit zkušební vzorky o průměru i výšce $50 \pm 0,3$ mm. Navázilo se předpokládané množství směsi, které se zhomogenizovalo ve speciálním mlýnku. Poté se směs přesypala do jaderníku, kde se třemi údery beranu pýchovacího přístroje spěchovala. Zkušební váleček se vytlačil z pouzdra a změřila se jeho výška. Pokud byla výška menší než 49,7 mm, navázilo se o pár gramů směsi více, a pokud byla výška větší jak 50,3 mm, navázilo se o pár gramů směsi méně a znovu se vytvořil zkušební váleček. Takto se postupovalo tak dlouho, až se dosáhlo předepsaného rozměru válečku.

Po zhotovení zkušebních válečků se na přístroji nastavila vhodná stupnice. Nejprve se měřila **pevnost v tlaku**, pro tu se podle tabulky nastavila příslušná stupnice, stupnice R_{cIII} . Váleček se vložil mezi rovnoběžné kruhové desky (čelisti) tlakového přístroje, umístěné v ose, se stejným označením jako má stupnice (R_{cIII}). Pohyblivá tlaková čelist se uvedla do pohybu příslušným tlačítkem přístroje tak, aby se tlak na váleček zvyšoval plynule. V okamžiku, kdy se váleček porušil, přestala působit tlaková síla a na stupnici přístroje byla odečtena hodnota pevnosti. Po odečtení hodnoty se příslušným tlačítkem stupnice vynulovala. Pro vzorek dané bentonitové směsi se naměřila hodnota pevnosti v tlaku $\sigma_{II} = 171 \text{ kPa}$.

Pro měření **pevnosti ve stříhu** se využili výměnné čelisti určené pro stříh, které jsou půlkruhové a působí jen na protilehlé poloviny ploch základen zkušební válečku. Nastavila se stupnice určená pro stříhové namáhání (stupnice R_{II}) a čelisti se umístily do příslušné osy. Dále se měření provádělo stejným způsobem jako při měření pevnosti v tlaku. Hodnota pevnosti ve stříhu se pro daný vzorek bentonitové směsi naměřila $\sigma_{střih} = 37 \text{ kPa}$.

Pro **pevnost v tahu** se vytvářely zkušební vzorky ve tvaru "osmičky či piškotu". Směs se navázila a zhomogenizovala jako při přípravě vzorků pro pevnost v tahu a ve stříhu, opatrně se přesypala do formy s daným tvarem a opět se třemi rázy beranu spěchovala.

Na přístroji se nastavila tahová stupnice R_{II} a vzorek se umístil do tahových čelistí a ty se příslušným tlačítkem přístroje uvedly do pohybu. V okamžiku, kdy se vzorek přetrhl, přestala působit tahová síla a na stupnici přístroje byla odečtena hodnota

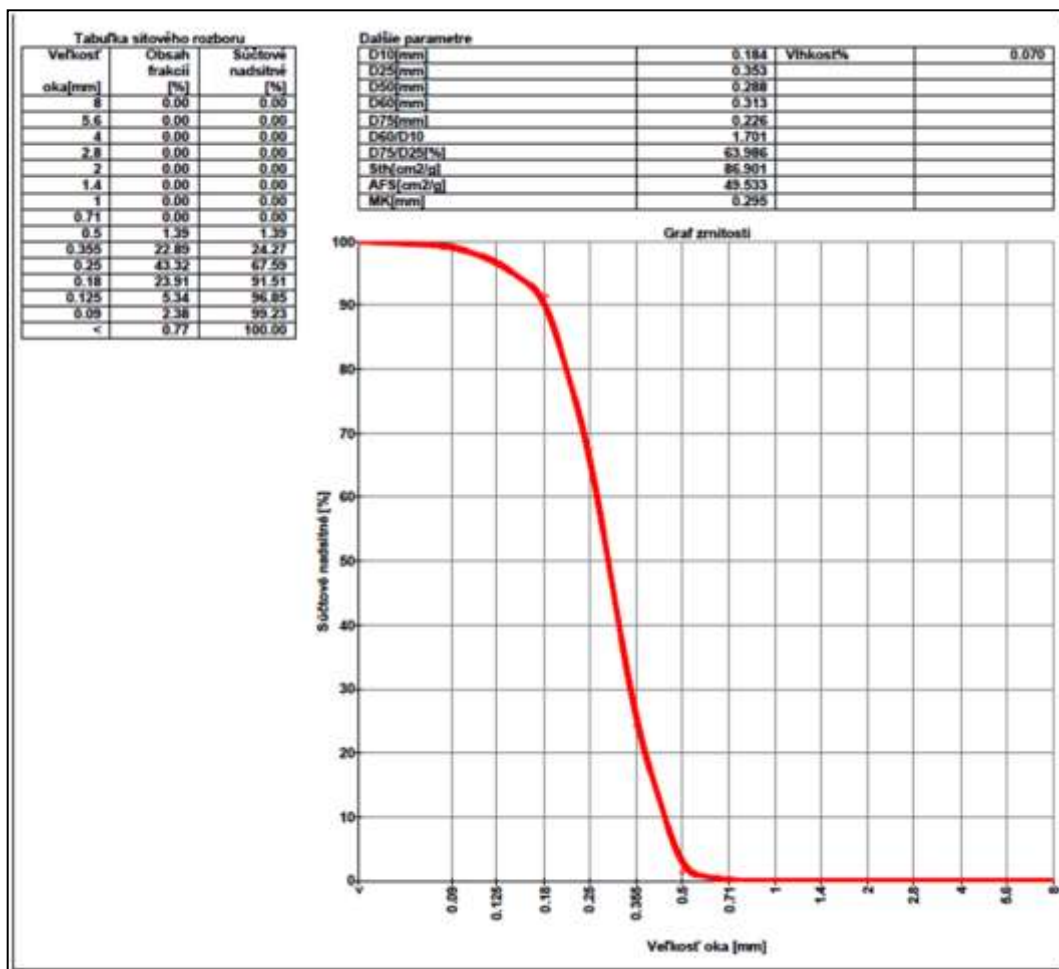
pevnosti. Pro vzorek dané bentonitové směsi se naměřila hodnota pevnosti v tahu $\sigma_{\text{tah}} = 34,5 \text{ kPa}$.

Následující tabulka 5-8 zobrazuje naměřené hodnoty technologických vlastností použitých směsí.

Tabulka 5-8 Tabulky naměřených hodnot pro JBS ozn. č. směsi 45 , ozn. JBS – MJ

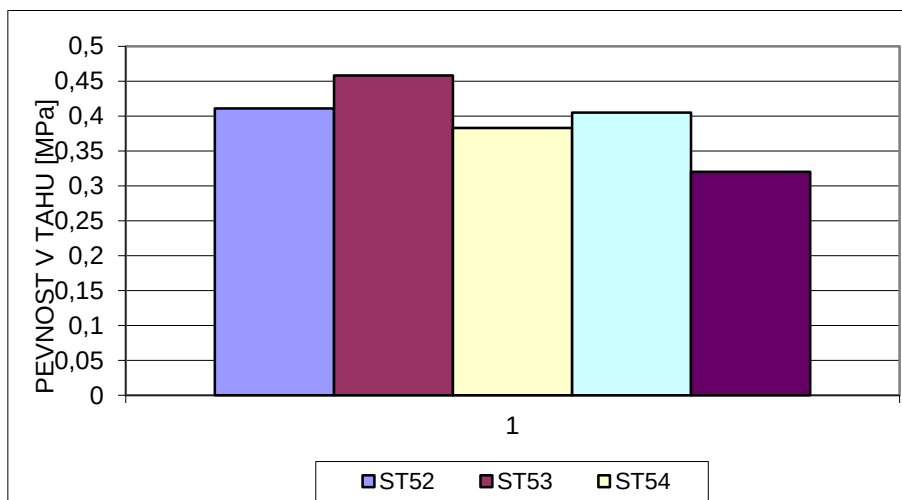
Pevnost v tlaku		Pevnost ve střihu	
Měření číslo	Naměřené hodnoty [kPa]	Měření číslo	Naměřené hodnoty [kPa]
1	159	1	39
2	172	2	35
3	171	3	37
4	178	4	38
5	167	5	39
6	178	6	35
Průměr	171	Průměr	37
Pevnost v tahu		Vlhkost	
Měření číslo	Naměřené hodnoty [kPa]	Měření číslo	Naměřené hodnoty [hmot. %]
1	40	1	3,037
2	25	2	3,141
3	42	3	3,122
4	40	4	3,129
5	35	5	3,117
6	25	6	3,153
Průměr	34,5	Průměr	3,117
Prodyšnost		Vyplavitelné látky	
Měření číslo	Naměřené hodnoty $\cdot 10^{-8}$ [m ² /Pa.s]	Měření číslo	Naměřené hodnoty [hmot. %]
1	156	1	14
2	153	2	13
3	150	3	14
4	155	4	13
5	151	5	14
6	150	6	13
Průměr	152	Průměr	13,5

Na obr. 5-25 je zobrazena granulometrická skladba ostřiva sp PR 33 použitého slévárenského ostřiva u vzorku č. 46 (Jádro Cold Box).



Obr. 5-25 Granulometrická skladba ostřiva použitého slévárenského ostřiva PR- 33 u vzorku č. 46 (Jádro Cold Box)

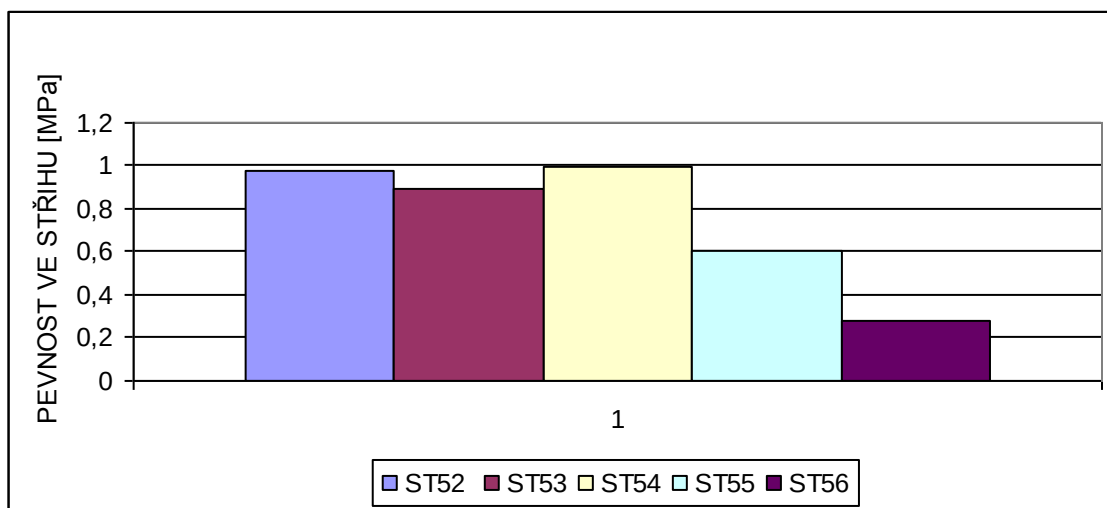
Na obr. 5-26 jsou graficky zobrazeny naměřené mechanické vlastnosti směsí střelečských písků **ST-52-PAP, ST-53-PAP, ST-54-PAP, ST-55-PAP, ST-56-PAP** a 3% pojiva Novanol. Tabulky 5-9 a 5-10 zobrazují výsledné hodnoty pevnosti v tahu pro směsi ST-52 PAP až ST 56 PAP s 3% pojiva Novanol.



Obr. 5-26 Naměřené mechanické vlastnosti (pevnosti v tahu) směsí ST-52-PAP, ST-53-PAP, ST-54-PAP, ST-55-PAP, ST-56-PAP střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

Tabulka 5-9 Vyhodnocení naměřených hodnot pevnosti v tahu směsí ST-52-PAP, ST-53-PAP, ST-54-PAP, ST-55-PAP, ST-56-PAP střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

Směsi s ostrivem	ST 52 PAP	ST 53 PAP	ST 54 PAP	ST 55 PAP	ST 56 PAP
Pevnost v tahu σ [MPa]	0,411	0,458	0,383	0,405	0,32



Obr. 5-27 Naměřené mechanické vlastnosti (pevnosti ve střihu) směsí ST-52-PAP, ST-53-PAP, ST-54-PAP, ST-55-PAP, ST-56-PAP střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

Tabulka 5-10 Vyhodnocení naměřených hodnot pevnosti ve střihu směsí ST-52-PAP, ST-53-PAP, ST-54-PAP, ST-55-PAP, ST-56-PAP střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

Směsi s ostřivem	ST 52 PAP	ST 53 PAP	ST 54 PAP	ST 55 PAP	ST 56 PAP
Pevnost ve střihu τ [MPa]	0,973	0,8904	0,991	0,608	0,282

Naměřené vlastnosti jednotné bentonitové formovací směsi označené **JBS - MJ** č. 45 jsou uvedeny v tabulce 5-11. Tato směs je určena pro výrobu na lince GZ a GF. Její složení je následující: Vratný písek, křemenný písek O-27, aktivovaný bentonit, kamenouhelná moučka a voda na předepsanou vlhkost.

Tabulka 5-11 Vlastnosti jednotné bentonitové směsi ozn. č. JBS – MJ

Technologické hodnoty směsi:	Použitý přístroj	hodnota
prodyšnost	GF-PRA,PED	min. 210 j.p.SI
pevnost v tlaku za syrova	GF-PRA,PFG	160-190 kPa
vlhkost (orientačně)	GF-PIT,PLW	3,5-4,5%
spěchovatelnost	GF-PRA,pos.mě.	35-44%
obsah vyplavitelných látek	GF-PWB,PLW	12,0-15,0%
ztráta žíháním	anal.váhy, pec	3,8-5,0%
celkový uhlík	leco	2,5-3,3
pH vodního výluhu(orientačně)	lab.pH-metr	9,0-9,5
obsah AB	titrace MM	9,0-12,0%

Naměřené vlastnosti jednotné bentonitové formovací směsi označené **JBS-BK** č. 53 jsou uvedeny na obr. 5-28. Tato směs je komplexní směs s pojivem bentonit typ Sabenil+ Sabenil K).

Naměřené vlastnosti jednotné bentonitové formovací směsi označené **JBS-SG 1** č. 47 jsou uvedeny na obr. 5-29. Tato směs je komplexní směs s pojivem bentonit typ Keribent C30).

č. zk.	Vlastnost	JBS - BK (jednotná bentonitová směs, Sabenil+Sabenil K)															Průměr
1	vlhkost směsi	%	3,12	3,05	3,10	3,0	3,25	3,17	2,97	3,96	3,83	3,47	3,64	3,32	2,94	3,26	3,29
2	spěchovatelnost	%	36	40	40	42	42,5	38,5	38	37	35	38	36	36	35	37,5	37,96
4	prodyšnost	n.j.p.	60	65	70	60	80	70	80	65	60	70	50	50	60	65	64,64
5	vaznost	kPa	133,7	138,5	155,7	160,2	157,5	139,4	152,2	181,9	151,2	159,8	178,6	127,6	176,5	146,7	154,25
6	pevnost ve štěpu	kPa	29	27	29	31	31	29	28	35	29	37	37	29	32	38	31,50
7	poměr štěp/vaznost		0,217	0,195	0,186	0,194	0,197	0,208	0,184	0,192	0,192	0,231	0,207	0,227	0,181	0,259	0,21
9	pevnost v tahu v kondenzační	kPa	2,2	1,8	2,3	2	2,9	2,6	2,4	2,8	3	3,3	3,3	2,8	2,6	2,8	2,63
10	hmotnost zkušebního válečku	g	148,8	148,8	148,6	148	148,5	147,5	148,8	149,8	151	148,3	150	150,7	149	150,8	149,19
11	obsah vyplavitelných látek	%	11,64	12,04	10,62	12,8	11,16	11,44	10,58	12,92	12,68	11,92	13,3	11,76	11,6	11,42	11,85
13	podíl zrn pod 0,125 mm	%	23,15	19,55	19,72	22,27	15,14	18,38	16,95	17,8	14,93	16,3	22,15	20,56	19,21	18,68	18,91
14	adsorpce MM	mg/g směsi	28,43	23,93	25,12	24,33	30	27,13	26,34	31,94	32,88	29,11	37,1	31,77	26,29	29,41	28,84
15	používaná známka bentonitu		Sabenil + Sabenil K														
16	adsorpce MM u nového bentonitu	mg/g bent.	337,26	321,21	332,61	309	333,52	323	341,62	319	339	312,55	315	316,64	320,91	325,33	324,76
17	obsah aktivního bentonitu (MM)	%	8,43	7,45	7,55	7,87	8,99	8,40	7,71	10,01	9,70	9,31	11,78	10,03	8,19	9,04	8,89
18	bentonit účinný	%															0,00
19	ztráta žháním	%	4,09	3,78	4,26	4,48	3,77	4,28	3,62	4,06	3,7	3,5	3,9	4,23	4,16	3,85	3,98
20	obsah těkavých látek	%	1,64	1,61	1,74	2,14	1,98	2,11	1,73	2,04	1,76	1,84	2,18	2,21	2,2	2,22	1,96
21	obsah lesklého C (orientačně)	%	0,06	0,08	0,06	0,09	0,04	0,05	0,03	0,07	0,04	0,05	0,04	0,11	0,08	0,03	0,06
22	obsah C zbytku	%	2,45	2,17	2,52	2,34	1,79	2,17	1,89	2,02	1,94	1,66	1,72	2,02	1,96	1,63	2,02
26	elektrická vodivost směsi	μS/cm	241	264	263	272	272	266	264	324	368	358	392	357	349	335	308,93
27	střední zrna ostřiva d ₅₀ po výplavě	mm	0,167	0,172	0,174	0,173	0,186	0,179	0,187	0,171	0,184	0,172	0,164	0,171	0,175	0,178	0,18
28	pravidelnost zrnitosti ostřiva		54,4	55,5	54,7	52,9	55,8	55,6	54,9	58,1	56	58,3	57,8	55,4	55	55,6	55,71

Obr. 5-28 Sledované vlastnosti jednotné bentonitové směsi JBS - Buzuluk Komárov (jednotná bentonitová směs, Sabenil+Sabenil K)

střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

č.	Vlastnost	JBS - SG 1 ozn. č. 47 (jednotná bentonitová směs, Keribent C30)															
zk.																	
1	vlhkost směsi	%	3,5-3,8	3,6	3,82	3,50	3,77	3,54	3,62	3,76	3,55	3,91	---	3,71	3,58	3,78	3,44
2	spéčovatelnost	%	34-38	40,5	40	38	35	40	38,5	40,5	38	37,5	---	39	38,5	36	40
4	prodyšnost	n.j.p.	60-90	70	80	90	70	70	70	85	90	60	---	100	80	70	80
5	vaznost	kPa	180-200	166,2	189,1	190,7	165,6	147,9	143,9	150,5	139,8	150,5	---	174,9	181	192,8	179,3
6	pevnost ve štěpu	kPa	34-38	30	39	43	31	34	34	31	31	27	---	---	36	39	32
7	poměr štěp/vaznost		min. 0,17	0,181	0,206	0,225	0,187	0,223	0,236	0,206	0,221	0,179	---	---	0,199	0,202	0,178
9	pevnost v tahu v kondenzační zóně	kPa	1,5-2,7	2,7	3,5	3,2	2,9	2,7	2,9	2,7	2,8	2,4	---	2,6	2,7	3	2,9
10	hmotnost zkušebního válečku	g	140-150	143,2	143,7	142,8	143,5	143,8	143,9	143,5	144,5	148,5	---	144,2	145,5	145,3	147,3
11	obsah vyplavitelných látek	%	13-16	13,06	13,72	14,42	13,34	13,1	13,46	12,88	12,64	12,74	13,1	13,98	13,34	14,52	12,24
13	podíl zrn pod 0,125 mm	%	15-20	20,26	14,28	14,3	18,35	18,02	18,68	12,88	12,02	13,73	16,64	13,11	9,96	15,78	14
14	adsorpce MM	mg/g směsi	28-33	34,93	36,34	38,94	34,83	32,6	34,95	32,39	31,45	33,73	28,53	33,63	33,74	35,7	33,18
15	používaná známka bentonitu			Keribent C30						K. C 25	KeribentC 30						
16	adsorpce MM u nového bentonitu	mg/g bent.		260	264,5	274,8	265,4	284,7	271,7	290,7	268,5	263,5	249,6	273	265,4	261,2	279,3
17	obsah aktivního bentonitu (MM)	%	8,5-10	10,81	11,06	11,41	10,56	9,22	10,35	9,02	9,43	10,30	9,20	9,92	10,23	11,00	9,56
19	ztráta žiháním	%	4-5	3,92	4,59	5,04	5,16	4,48	4,29	3,94	3,79	4,13	4,06	5,23	4,08	4,36	3,77
20	obsah těkavých látek	%	max. 2,5	1,81	2,23	2,55	2,87	2,21	2,49	2,15	2,06	2,27	2,41	3,31	2,08	2,21	1,8
21	obsah lesklého C (orientačně)	%	min. 0,05	0,21	0,15	0,2	0,14	0,14	0,14	0,12	0,13	0,11	0,08	0,1	0,11	0,13	0,09
22	obsah C zbytku	%	1,5- 2,5	2,11	2,36	2,49	2,29	2,27	1,8	1,79	1,73	1,86	1,65	1,92	2	2,15	1,97
23	spal. látky v ostřivu	%	max. 3,5	---	---	---	1,37	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
24	spalitelné látky ve výplavu	%	max. 4	---	---	---	3,79	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
26	elektrická vodivost směsi	μS/cm	300-400	369	430	380	431	417	402	392	419	356	375	380	395	420	393
27	střední zmo ostřiva d ₅₀ po výplavě	mm	0,17-0185	0,168	0,193	0,184	0,175	0,175	0,171	0,184	0,194	0,181	0,172	0,198	0,205	0,19	0,193
28	pravidelnost zrnitosti ostřiva		55-65	59,2	58,8	60,4	59,2	58,5	58,5	59,2	60,2	60,9	61,1	60,7	62,3	59,1	59,2
29	celkový jíl	%	---	---	---	9,93	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
30	mrtvý jíl	%	max. 2,5-3	---	---	---	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
31	stupeň oolitizace zm	%	5 - 15	---	---	---	4,97	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
32	obsah křemene	%	---	---	---	79,94	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Obr. 5-29 Sledované vlastnosti jednotné bentonitové směsi JBS - SG 1 (jednotná bentonitová směs, Keribent C30) střelečských písků a 3% pojiva Novanol.

6. CHEMICKÉ REAKCE PROBÍHAJÍCÍ PŘI TEPELNÉM ZATÍŽENÍ NETRVALÝCH PÍSKOVÝCH FOREM

Vzhledem ke komplikovanosti některých měření vlastností slévárenských materiálů používaných během slévárenské výroby, resp. také při výběru vhodné směsi již ve stádiu přípravy seriové výroby, je snaha analyzovat tyto materiály bez použití měřicí techniky. Tato komplikovanost souvisí především s výskytem vysokých teplot téměř ve všech základních slévárenských operacích. To klade značné nároky na použité měřicí zařízení a na životnost těchto přístrojů, případně odpovídající měřících sond. Proto jsem se rozhodl analyzovat nejpravděpodobnější chemické pochody probíhající ve slévárenských procesech a díky tomu způsobující potenciální komplikace během procesu metalurgické přípravy, slévárenského procesu ale hlavně mohou způsobit potenciální vady na finálních odlitcích. Mou snahou je tedy na základě znalosti použitých slévárenských materiálů a znalosti tepelně – fyzikálních podmínek matematicko – chemickým výpočtem stanovit objem uvolněných plynů z dané směsi (viz Kapitola 6.1.) a následně v kapitole 6.2. provést výpočty změny Gibbsovy energie pro námi sledované chemické reakce. Výsledky této kapitoly mohou na výsledné slévárenské směsi komparativně interpolovat výsledky vzniklých plynů a látek a objasnit chemickou aktivitu vybraných slévárenských směsí.

6.1 Výpočty chemických reakcí plynů v pískových formách

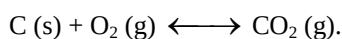
Výpočty uvolněných plynů, které nejvíce přispívají k plynotvornosti, byly provedeny za účelem získání představy, která reakce nejvíce vykazuje množství plynné látky a v podstatě přispívá k plynotvornosti formovacích a jádrových směsí. Tyto reakce jsou patrné z tabulky 6-1. Zde jsou uvedeny typy chemických reakcí a k nim odpovídající výsledky množství uvolněných plynů z 1 g hlavní složky uvedené reakce. Výpočet byl proveden na základě rovnosti látkového množství na počátku a na konci chemické reakce.

Tabulka 6-1 Výsledky výpočtů uvolněných plynů z uvedených reakcí

Typ reakce	Množství uvolněných plynů z 1 gramu složky
$\text{C (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \longleftrightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)}$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO ₂ (g)
$2\text{C (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \longleftrightarrow 2\text{CO (g)}$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO (g)
$\text{C (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)} \longleftrightarrow 2\text{CO (g)}$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm ³ CO (g)
$\text{C (s)} + \text{H}_2\text{O (g)} \longleftrightarrow \text{CO (g)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm ³ směsi plynů CO(g) a H ₂ (g).
$\text{C (s)} + 2\text{H}_2\text{O (g)} \longleftrightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)}$	z 1g C(s) vznikne 5,598 dm ³ směsi plynů CO ₂ (g) a H ₂ (g).
$\text{Fe (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)} \longleftrightarrow \text{FeO (s)} + \text{CO (g)}$	z 1g Fe(s) vznikne 0,4 dm ³ CO(g)
$3\text{Fe (s)} + 4\text{H}_2\text{O (g)} \longleftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (s)} + 4\text{H}_2\text{(g)}$	z 1g Fe(s) vznikne 0,534 dm ³ H ₂ (g)
$\text{FeO (s)} + \text{C (s)} \longleftrightarrow \text{Fe (s)} + \text{CO (g)}$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO(g)
$\text{CH}_4 \text{ (g)} \longleftrightarrow \text{C (s)} + 2\text{H}_2 \text{ (g)}$	z 1dm ³ CH ₄ (g) vznikne 2 dm ³ H ₂ (g)
$\text{CaCO}_3 \text{ (s)} \longleftrightarrow \text{CaO (s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$	z 1g CaCO ₃ (s) vznikne 0,224 dm ³ CO ₂ (g)

Poznámka: U výpočtů vzniku plynů z těchto chemických rovnic je výpočet proveden s tím, že reakce proběhne kvantitativně beze zbytku, tzn., že vše proběhne na 100%, pro přesnější výpočet je ještě možné počítat s ustálením tzv. dynamické rovnováhy, což pro naše potřeby není nutné.

Kompletní příklady výpočtů pro další reakce jsou uvedeny v příloze č. 4. V této kapitole je uveden pouze ukázkový výpočet pro rovnici:



Pro výpočet látkového množství lze použít vztah:

$$n = \frac{m}{M}; \quad n = \frac{V}{V_m}; \quad (6.1)$$

kde značí: n - látkové množství [mol]; m - hmotnost [g]; V - objem [dm³]; V_m - univerzální měrná plynová konstanta = 22,41 dm³ · mol⁻¹; M - relativní molekulová hmotnost [g.mol⁻¹].

Relativní molekulová hmotnost:

$$M(\text{C}) = 12,01 \text{ g.mol}^{-1}; \quad M(\text{O}_2) = 31,999 \text{ g.mol}^{-1}; \quad M(\text{CO}_2) = 44,010 \text{ g.mol}^{-1}.$$

$$n_{\text{C}} = n_{\text{CO}_2}; \quad (6.2)$$

$$\frac{m_{\text{C}}}{M_{\text{C}}} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_m}; \quad (6.3)$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4 \cdot 1}{12} = 1,87 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2(\text{g}); \quad (6.4)$$

Z 1 g C(s) tedy chemickou reakcí $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \longleftrightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ vznikne 1,87 dm³ plynného CO₂.

6.2 Výpočty změn Gibbsovy energie pro sledované chemické reakce

Druhý typ výpočtů, které se týkají stanovení hodnot Gibbsovy energie, má přispět především k teoretickým poznatkům o plynotvornosti formovacích a jadrových směsí. Tyto výpočty byly provedeny na základě prostudování fyzikálně-chemických výpočtů o stanovení hodnot termodynamických stavových funkcí. Výpočty byly aplikovány pro stejné reakce, viz tabulka 6-1, které přicházejí v úvahu následkem vzniku podmínek tepelného zatížení slévárenských forem a jader. V této kapitole jsou uvedeny postupy a výsledky výpočtů změn Gibbsových energií aplikované pro chemické rovnice z kapitoly 6.1. „Výpočty chemických reakcí plynů v pískových formách“. Tedy pro chemické změny a reakce nejčastěji probíhající ve formách a jádrech po zalití tekutým kovem. Pro rovnice číslo 1 je v této kapitole proveden kompletní vzorový výpočet. Další výpočty Gibbsovy energie pro další rovnice jsou uvedeny v příloze č. 6. Souhrnná tabulka výpočtů změn Gibbsovy energie včetně stanovení mezních teplot pro průběhy dějů a použitých chemických reakcí a včetně odpovídajících rovnic přímek odpovídajících teplot jsou uvedeny v příloze č. 13.

Pro výpočet Gibbsovy energie jsou potřebné hodnoty odpovídajících veličin tabelovány a lze je nalézt ve fyzikálně chemických tabulkách metalurgických pochodů, nebo v jiných podobných tabulkách. Hodnoty těchto veličin potřebných pro výpočty prováděné v této kapitole jsou uvedeny v příloze č. 5 “ Výběr termodynamických hodnot prvků a sloučenin“. Mezi potřebné veličiny hodnot Gibbsovy energie chemické reakce se řadí molární tepelná kapacita, entalpie, entropie, změna molární tepelné kapacity a také vnitřní energie.

Molární tepelnou kapacitu lze stanovit ze vztahu:

$$C = M \cdot c, \quad (6.5)$$

kde značí: M - relativní molární hmotnost látky [Kg.kmol⁻¹]

c - měrná tepelná kapacita [J.Kg⁻¹.K⁻¹]

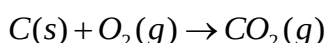
Hodnoty molárních tepelných kapacit jsou závislé na teplotě. Hodnoty molárních tepelných kapacit v závislosti na teplotě se stanovují na základě experimentů. K výpočtům používáme teplotní závislosti molárních tepelných kapacit ve tvaru mocninné řady:

$$c_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + c' \cdot T^{-2}, \quad (6.6)$$

kde značí: a, b, c, c' - experimentálně stanovené konstanty.

Tyto konstanty nalezneme ve fyzikálně-chemických tabulkách. Hodnoty jsou ovšem použitelné vždy jen pro konkrétní teplotní intervaly, které jsou tabelované (viz příloha č. 5). Podrobné výpočty pro všechny, v této kapitole uvedené rovnice chemické rovnice jsou uvedeny v příloze č. 13.

Změna molární tepelné kapacity pro rovnici:



je určena rozdílem součtu molárních tepelných kapacit produktů reakce a součtu molárních tepelných kapacit látek, které vstupují do reakce

$$\Delta C_p = \sum n(C_p)_{\text{produktů}} - \sum n(C_p)_{\text{vstupující}}. \quad (6.7)$$

Potřebné hodnoty pro výpočet jsou:

$$C: c_p = 17,16 + 4,27 \cdot 10^{-3}T - 8,79 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ pro interval teplot } [298-2300] \text{ [K]}$$

$$O_2: c_p = 29,97 + 4,19 \cdot 10^{-3}T - 1,67 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ pro interval teplot } [298-3000] \text{ [K]}$$

$$CO_2: c_p = 44,16 + 10,5 \cdot 10^{-3}T - 8,53 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ pro interval teplot } [298-2500] \text{ [K]}$$

Výpočtem stanovíme změnu jednotlivých konstant $\Delta a, \Delta b, \Delta c$:

$$\Delta a = 44,16 - (17,16 + 29,97) = -2,97$$

$$\Delta b = 10,5 - (4,27 + 4,19) = 2,04$$

$$\Delta c = -8,53 - (-8,79 - 1,67) = 1,93$$

Lze tedy zapsat změnu molární tepelné kapacity pro výše uvedenou chemickou rovnici

$$\Delta c_p = -2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ pro teplotní interval } [298 - 2300] \text{ [K]}.$$

Termodynamické potenciály (Gibbsova energie, Helmholtzova energie, entalpie a entropie), jsou závislé pouze na počátečních a konečných podmínkách stavů systémů.

Změnu entalpie, resp. reakčního tepla, pro výše uvedenou chemickou reakci lze stanovit na základě tzv. Hessova zákona, lze psát:

$$\Delta H_{298}^0 = \left[\sum n(\Delta H_{298}^0)_{\text{sluč}} \right]_{\text{kon}} - \left[\sum n(\Delta H_{298}^0)_{\text{sluč}} \right]_{\text{poč}}. \quad (6.8)$$

$$\frac{d\Delta H}{dT} = \Delta C_p, \quad (6.9)$$

kde značí: ΔH - přírůstek reakčního tepla během reakce; T - teplotu reakce; ΔC_p - změnu molární tepelné kapacity během reakce.

Provádí se na základě potřebných hodnot standardní slučovací entalpie a entropie stanovených při standardních podmínkách, tj. 298 K a tlaku 103525 Pa. Analogickým způsobem, jako je rovnice (6.8), vypočítáme změnu entropie při standardních podmínkách.

$$\text{C: } \Delta H_{298} = 0 \text{ [J.mol}^{-1}] \quad \Delta S_{298} = 5,73 \text{ [J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$\text{O}_2(\text{g}): \Delta H_{298} = 0 \text{ [J.mol}^{-1}] \quad \Delta S_{298} = 205,2 \text{ [J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

$$\text{CO}_2(\text{g}): \Delta H_{298} = -393690 \text{ [J.mol}^{-1}] \quad \Delta S_{298} = 213,74 \text{ [J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Vypočítané hodnoty pro výše uvedenou rovnici jsou:

$$\Delta H_{298} = -393690 \text{ [J.mol}^{-1}]$$

$$\Delta S_{298} = 2,81 \text{ [J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}]$$

Hodnota změny entropie pro konkrétní teplotu při standardním tlaku se vypočítá dle rovnice:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p \cdot dT, \quad (6.10)$$

Pro výše uvedenou chemickou reakci a teploty 800 °C, 1000 °C a 1200 °C lze provést výpočty s využitím rovnice 6.10:

$$800^\circ\text{C: } \Delta H_{1073,16} = -393690 + \int_{298}^{1073,16} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) dT = -394440 \text{ [J]}$$

$$1000^\circ\text{C: } \Delta H_{1273,16} = -393690 + \int_{298}^{1273,16} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) dT = -394527 \text{ [J]}$$

$$1200^{\circ}\text{C}: \Delta H_{1473,16} = -393690 + \int_{298}^{147316} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) dT = -394541 [\text{J}]$$

Stanovení změny entropie - podobně jako na předchozím případě lze vypočítat změnu entropie pro výše uvedenou chemickou reakci.

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p \frac{dT}{T}. \quad (6.11)$$

Pro teplotu 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.

$$800^{\circ}\text{C}: \Delta S_{1073,16} = 2,81 + \int_{298}^{107316} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}}{T} \right) dT = 1,58883 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$1000^{\circ}\text{C}: \Delta S_{1273,16} = 2,81 + \int_{298}^{127316} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}}{T} \right) dT = 1,51353 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$1200^{\circ}\text{C}: \Delta S_{1473,16} = 2,81 + \int_{298}^{147316} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,93 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}}{T} \right) dT = 1,50325 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Stanovení změny Gibbsovy energie pro výše uvedenou chemickou reakci: v této souvislosti je nutno podotknout, že Gibbsova energie je ta část energie, kterou lze uvolnit ze soustavy a může konat práci při konst. tlaku a teplotě. Současně je velmi důležitá při charakteristikách průběhu dějů. Jak je obecně známo, děje probíhají tehdy, pokud Gibbsova energie klesá nebo je změna Gibbsovy energie záporná. V této souvislosti je nutno konstatovat, že výpočty této termodynamické stavové funkce byly provedeny za účelem stanovení změny v průběhu sledování reakce. Pro změnu Gibbsovy energie lze psát:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T \cdot \Delta S_T^0 \quad (6.12)$$

Dosazením do rovnice (6.12) dílčí, výše uvedené výsledky, lze stanovit hodnoty změny Gibbsovy energie pro výše uvedenou chemickou reakci pro teploty 800 °C, 1000 °C a 1200 °C.

$$\Delta G_{800^{\circ}\text{C}}^0 = -396145 [\text{J}]$$

$$\Delta G_{1000^{\circ}\text{C}}^0 = -396454 [\text{J}]$$

$$\Delta G_{1200^{\circ}\text{C}}^0 = -396756 [\text{J}]$$

Analogickým způsobem lze určit všechny hodnoty potřebných veličin pro výpočet změny Gibbsovy energie u všech chemických reakcí uvedených v tabulce 6-1. Provedené výpočty jsou uvedeny v příloze č. 13.

7. VYUŽITÍ POČÍTAČOVÝCH SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ JAKO NÁSTROJE K PREDIKCI A ELIMINACI VAD ODLITKŮ

V současné době se i ve slévárenství stále více uplatňuje výpočetní technika a to ve dvou oblastech. Jedna oblast je technologie, řízení celého výrobního procesu, včetně ekonomických ukazatelů výroby nebo alespoň řízení formovacích a odlévacích linek, dále řízení pracovního cyklu při vysokotlakém lití. Druhá oblast se týká simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků. Tato oblast umožňuje předurčení případných výrobních chyb a nepřesností v době přípravy výroby nebo řešení technologických problémů, systematické odstraňování technologických chyb a úprav již vyráběného odlitku.

První slévárenské simulační programy se objevily v 80. letech minulého století a byly většinou japonské provenience. Dnes nacházíme na evropském trhu celou řadu komplexních slévárenských simulačních programů, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh, stále se inovují, doplňují a pro uživatele se tím rozšiřují možnosti jejich uplatnění. Všechny tyto programy se orientují zejména na řešení těchto hlavních skupin problémů: plnění forem; tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy); vznik struktury a utváření vlastností odlitku; vznik vnitřních pnutí a deformací.

V současné době slévárenská technologie využívá numerické simulační výpočty a predikuje především proces tuhnutí a chladnutí odlitků.

Numerické simulační výpočty všeobecně přispívají ke snížení výrobních nákladů odlitků. Na našem pracovišti - Katedra strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie - se kromě simulací reálných odlitků zabýváme simulačními výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a formou. K tomuto účelu dnes slouží simulační program MAGMA 5. Kvalita simulačního výpočtu závisí na matematickém modelu programu a dostupnosti a především přesnosti odpovídajících tepelně-fyzikálních veličin odlitku a slévárenské formy. Na našem pracovišti byla vyvinuta metodika, kdy jsou nejdříve prováděny experimentální měření na ověření vstupních dat simulace a teprve následně prováděny simulační výpočty s odlitky jednoduchých tvarů pro porovnání s reálným procesem lití.

Principy výpočtů těchto simulačních programů souvisí s faktem že utváření odlitků ve slévárenských formách závisí na nestacionárních podmínkách.

Pro nestacionární podmínky sdílení tepla je teplota T funkcí polohy a času $T = T(x, y, z, t)$ a teplotní pole je popsáno diferenciální rovnicí:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (7.1)$$

kde značí: c_p - měrnou tepelnou kapacitu materiálu;

ρ - hustotu materiálu;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - tepelnou vodivost materiálu v jednotlivých směrech;

Q - tepelný výkon vnitřních zdrojů.

Rovnice (7.1) popisuje nestacionární teplotní pole pro anizotropní materiál s vnitřními zdroji energie.

Nestacionární podmínky sdílení tepla v rovnici (7.1) představuje člen $c_p \rho (\partial T / \partial t)$.

Hodnotu tohoto členu lze pak považovat za předepsanou funkci polohy.

Pro úspěšné řešení rovnice (7.1) je nutno formulovat počáteční a okrajovou podmínku:

Počáteční podmínka - charakterizuje teplotní pole tělesa v okamžiku $t=0$, což lze vyjádřit: $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$.

Okrajová podmínka - na povrchu vyšetřované oblasti platí podmínka 3. druhu:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q + \alpha T = 0 \quad (7.2)$$

kde značí: l_x, l_y, l_z - směrové kosiny normály k povrchu;

q - měrný tepelný tok na povrchu oblasti;

α - součinitel přestupu tepla.

Jak je z variačního počtu obecně známé, lze řešenou úlohu formulovat také podmínkou minima určitého integrálu (funkcionálu).

Podle Eulerova teoremu je nutná a postačující podmínka pro existenci extrému integrálu $I(u)$:

$$I(u) = \iiint_V f(x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}) dydzdx \quad (7.3)$$

Podmínkou je, aby neznámá funkce $u(x, y, z)$ splňovala v téže oblasti diferenciální rovnici:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)} \right] - \frac{\partial f}{\partial u} = 0 \quad (7.4)$$

Musí platit za předpokladu stejných okrajových podmínek v obou případech.

Podle Eulerova teorému ekvivalentní formulace k rovnici (7.1) je vyjádření podmínky minima objemového integrálu $\Phi(T)$ pro dané okrajové podmínky pro teplotu (T).

Tento funkcionál pro nestacionární podmínky sdílení tepla má tvar:

$$\Phi(T) = \iiint_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) T dx dy dz \quad (7.5)$$

Při zahrnutí výše uvedené okrajové podmínky do rovnice (7.5) se získá rozšířený tvar funkcionálu o jeden člen a lze psát:

$$\begin{aligned} \Phi(T) = & \iiint_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) T dx dy dz \\ & + \iint_S \left\{ \frac{1}{2} \alpha (T - T_0)^2 + q T \right\} dS \end{aligned} \quad (7.6)$$

kde značí: S - povrch, na kterém je udán tepelný tok nebo součinitel přestupu tepla.

Pro technickou aplikaci je často rovnice (7.6) rozpracována do tohoto tvaru:

$$\begin{aligned} \Phi(T) = & \iiint_V \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \iiint_V [Q - c_p \rho \frac{T}{\partial t}] T dx dy dz + \\ & + \frac{1}{2} \iint_S \{ \alpha(u, v) T^2 - q(u, v) T \} du dv \end{aligned} \quad (7.7)$$

kde značí: V - objem tělesa; S - plochu tělesa, kterou je předáváno teplo z odlitku do formy; T - teplotu; x, y, z - souřadnice; ρ - hustotu; c_p - měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku; Q - tepelný výkon vnitřních zdrojů; u, v - souřadnice sledovaného místa plochy; α - součinitel přestupu tepla; q - hustotu tepelného toku.

Rovnice (7.7) je aplikována při simulačních výpočtech tuhnutí a chladnutí odlitků.

Její aplikaci je možno použít na základě numerické metody konečných diferencí (FDM – Finite Differences Method). Podstatou FDM je pokrytí oblasti, v níž hledáme řešení diferenciální rovnice, specifickou sítí, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. V každém bodě sítě se nahradí derivace v těchto uzlových bodech příslušnými diferencemi, tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot v okolních bodech [102][103][104].

Po záměně derivací diferencemi ve všech uzlových bodech dostáváme soustavu lineárních algebraických rovnic s neznámými hodnotami posunů v těchto uzlových bodech. Modelované těleso se skládá ze základních elementů ve tvaru krychle viz obr. 7-7. Čím více je použito elementů, tím podrobnější je tvarová charakteristika tělesa.

Na tvorbě sítě objemových elementů dle metody FDM je založen simulační program **MAGMA 5** firmy Magma GmbH Aachen.

Simulační výpočet se skládá ze tří základních kroků, k jejich uskutečnění slouží tzv. výpočtové moduly.

První modul je určen k vytvoření nebo načtení geometrie tzv. *pre-processing*. Hlavní výpočtový modul se označuje *main-processing*, který provádí vlastní simulační výpočet a na něj je vázán modul, tzv. *post-processing*, který zobrazuje výsledky simulačního výpočtu. Součástí každého simulačního softwaru je databáze, což je přehled tepelně-fyzikálních veličin používaných materiálů odlitků i forem. Databáze nejnovějších simulačních programů obsahují hodnoty alespoň některých fyzikálních veličin v závislosti na teplotě (tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, hustotu, součinitel přestupu tepla). Téměř u všech simulačních programů je možnost databanku rozšiřovat o hodnoty vlastních materiálů, případně hodnoty z databáze editovat na základě vlastních experimentálních měření [100][101].

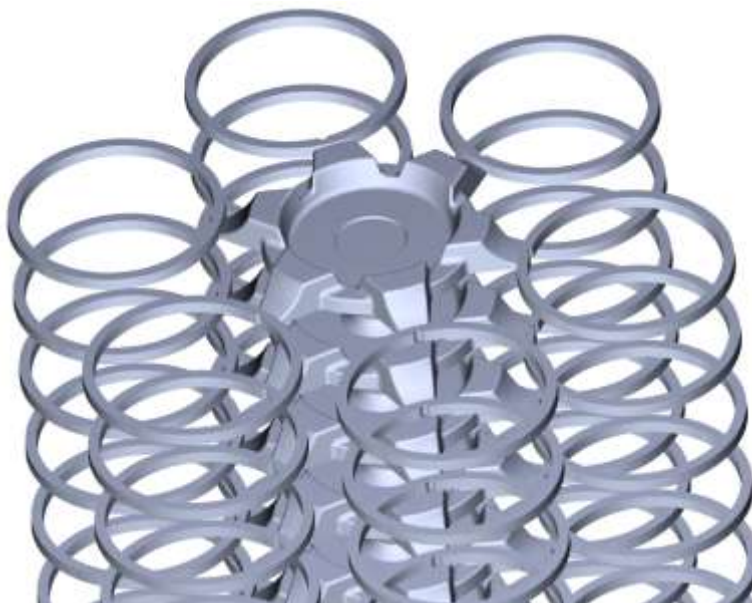
Kvalita simulačních programů je velmi rozdílná, závisí na různých okolnostech, především na kvalitě tepelně-fyzikálního popisu dějů, které probíhají při vytváření odlitků ve slévarenských formách. Poměrně velkým problémem při uplatnění simulačních programů je uplatnění správných hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin použitých materiálů. Zde je nutno zmapovat tyto hodnoty v závislosti na teplotě a doplnit je do databáze softwaru. Nedostatek hodnot odpovídajících veličin v závislosti

na teplotě bývá nejčastěji příčinou rozdílů mezi výsledky získanými simulací, resp. simulačním výpočtem a příp. prováděným experimentálním měřením při srovnatelných podmínkách. Následující simulace popisuje gravitační lití pístních kroužků do 17 etážové formy za použití jednotné bentonitové směsi. Odlitek je odlit z litiny z lupínkovým grafitem. Produkce pístních kroužků je reálně odlévána ve slévárně Buzuluk a.s. Komárov. Analyzované a porovnávané vady uvedené v této práci jsou vady z reálných pístních kroužků této produkce.

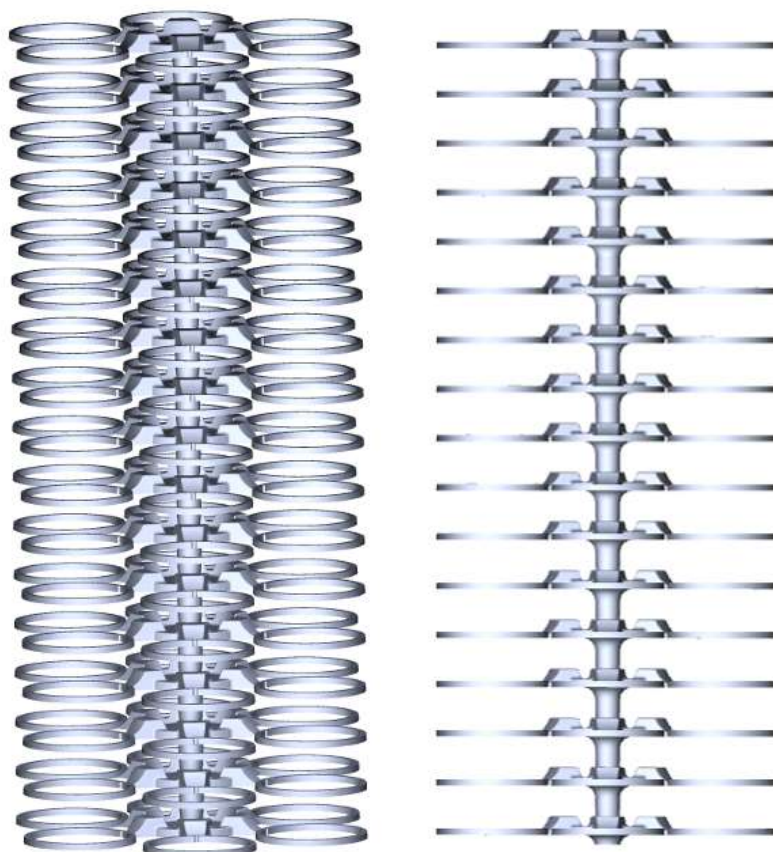
Simulační výpočet této produkce je realizovaný v této práci za účelem popisu nejen simulačního programu Magma5 ale také k popisu a porovnání vad prokázaných počítačovou simulací s reálnými vadami na těchto odlitcích malých rozměrů. V kap. 8.3 jsou dále některé výsledky simulace využity jako nástroje k vyhodnocení tepelné degradace bentonitu pískové formy a využity k výpočtům regenerace bentonitu.

7.1 Příprava podkladů, parametrů a tepelně-fyzikálních veličin potřebných k simulačnímu výpočtu

Pro simulační výpočet procesu lití je velmi důležitá příprava podkladů, které se týkají geometrie odlitku, materiálů (formy, odlévaného materiálu) a samotných podmínek lití. Nejprve bylo nutno připravit geometrii odlitku, formy a všech součástí použitých při reálném lití. Pro následné nastavení parametrů jednotlivých součástí bylo nutné rozdělit modely všech součástí jednak na jednotlivé odlitky a vtokovou soustavu, ale také z hlediska kategorií na základě stejné povahy jejich materiálu. Poté bylo nutné převést 3D model do správného formátu, kterým pro nás byl *.sat. (V rámci Katedry KSP TU v Liberci na základě dostupné licence můžeme využívat formáty *.sat. a *.stl.) Výsledný model odlitku 17ti etážové formy pístních kroužků je zobrazen na obr. 7-1 a 7-2.



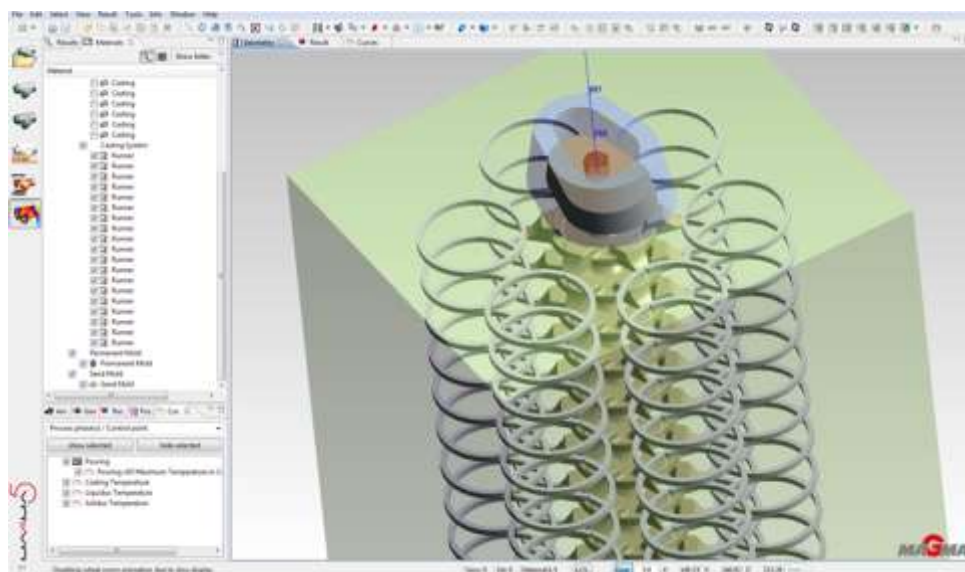
Obr. 7-1 Model sestavy odlitků s vtokovou soustavou



Obr. 7-2 Model sestavy odlitků s vtokovou soustavou

Forma pro odlévání je písková a je tvořena z obdélníkových formovacích rámečků naskládaných na sebe do sloupce, forma se vytvářela až následně přímo v softwaru Magma5. Reálně používaná forma neobsahuje ani licí jamku, ta je zde nahrazována

speciálním přípravkem pokládaným na vrchní část formy a proto bylo nutné tento přípravek vymodelovat dle výkresové dokumentace výrobce viz obr. 7-3.



Obr. 7-3 Model sestavy odlitků s vtokovou soustavou v pracovním prostředí Magma5 včetně modelu pískové formy

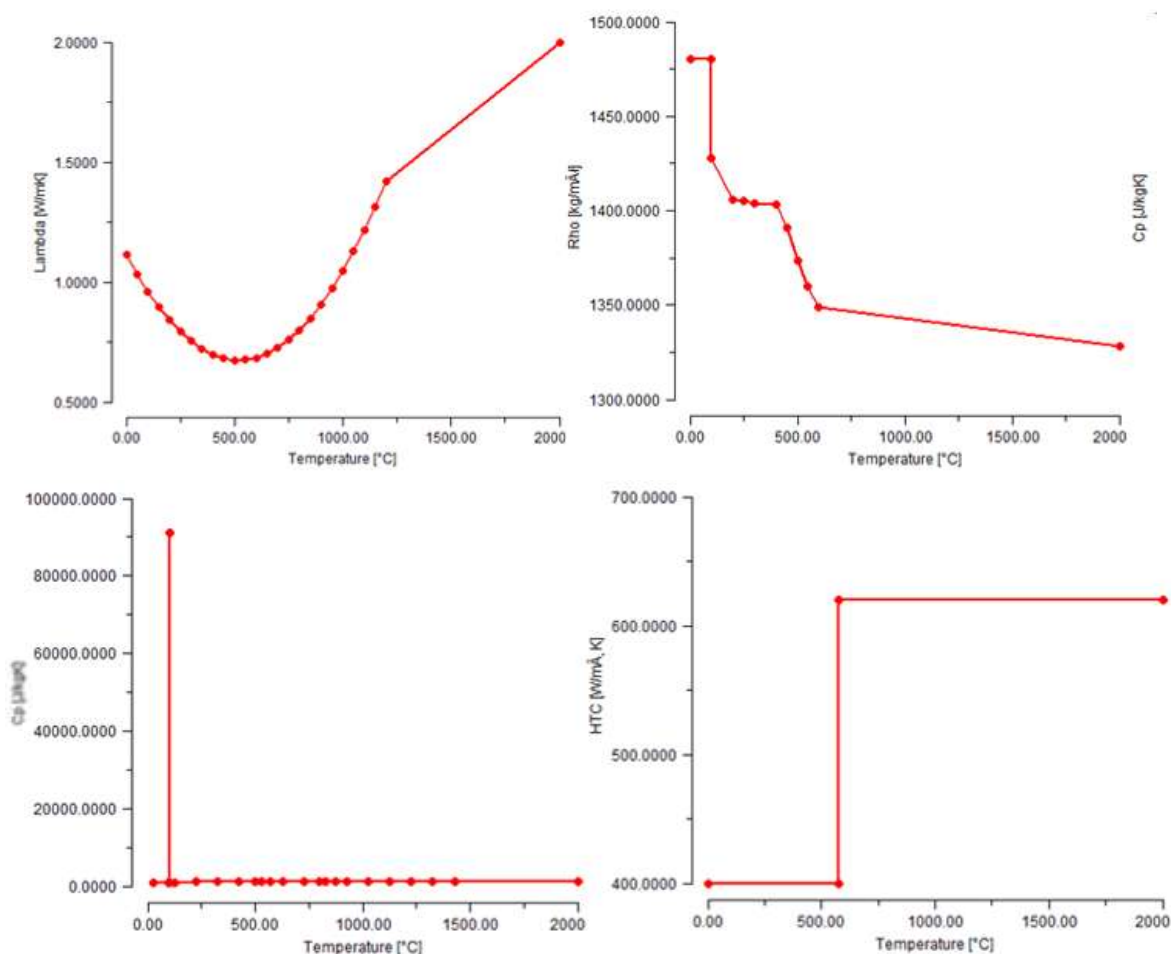
Dalšími velice důležitými parametry potřebnými pro simulaci jsou podmínky procesu lití (teplota lití, teplota formy, metalurgická operace očkování, doba lití, výška kovu v jamce, výška proudu kovu nad vtokem atd.) a typ použité slitiny materiálů jak odlitku, tak formy. Pro tyto potřeby byla sestavena tabulka vstupních parametrů simulace, viz Tab. 7-1. Složení a vlastnosti formovací směsi byly měřeny na KSP TU v Liberci a výsledky ověřovány s výsledky technologů firmy KERAMOST, a.s., která pravidelně tyto pískové směsi dodává slévárně Buzuluk a.s. a dle smluvních vztahů také průběžně kontroluje.

Tabulka 7-1 Hodnoty veličin potřebné pro simulační výpočty plnění a tuhnutí litin

Název odlitku		pístní kroužek	
Materiál odlitku		šedá litina	
Materiál formy	pro JBS vlhkost směsi	Jednotná bentonitová směs 2,9 - 3,1%	
Materiál jader			
Materiál chladičů			
Filtry	výrobce, typ, ppl		
	rozměry		[mm]
Rozměry formovacích rámců		390x340x35	[mm]
Rozměry formy	bezrámové formování		[mm]
Obklady nálitků	výrobce, typ, exo/izo		
	tloušťka vrstvy		[mm]
Zásyp nálitků	výrobce, typ, exo/izo		
Licí teplota	předpis	1400 - 1470	[°C]
	reálný rozptyl od - do	1420 - 1470	[°C]
Teplota formy		cca 30	[°C]
Teplota jader			[°C]
Očkování	způsob	do licí pánve na dno	
		na bázi FeSi (SUPERSEED)	
	množství očkovadla	0,5 - 1,0 % dle velikosti odlitku	
	prodleva očkování - lití	max. 2min	
Modifikace	způsob		
	typ modifikátoru		
	množství modifikátoru		
	prodleva modifikace - lití		
Doba lití	předpis	není předepsáno	[s]
	reálný rozptyl od - do	cca 20s sloupec	[s]
Výška kovu v jamce		1,5 - 2	[cm]
Výška proudu kovu nad vtokem		max.15	[cm]
Vytloukání z formy	čas nebo teplota	za cca 10min	

Chemické složení (průměr z reality)	C	3,7	[%]
	Ce		[%]
	Cr	0,1	[%]
	Cu	0,1	[%]
	Mg		[%]
	Mn	0,6	[%]
	Mo	0,01	[%]
	N	25	[ppm]
	Ni	0,03	[%]
	P	0,5	[%]
	S	0,05	[%]
	Sb	0,003	[%]
	Si	2,6	[%]
	Sn	0,005	[%]

Na základě získaných dat byly optimalizovány odpovídající závislosti tepelně - fyzikálních veličin (hustota, měrná tepelná kapacita, koeficient přestupu tepla a tepelná vodivost). Na obr. 7 - 4 jsou výsledné závislosti tepelně – fyzikálních veličin použité při této konkrétní simulaci.

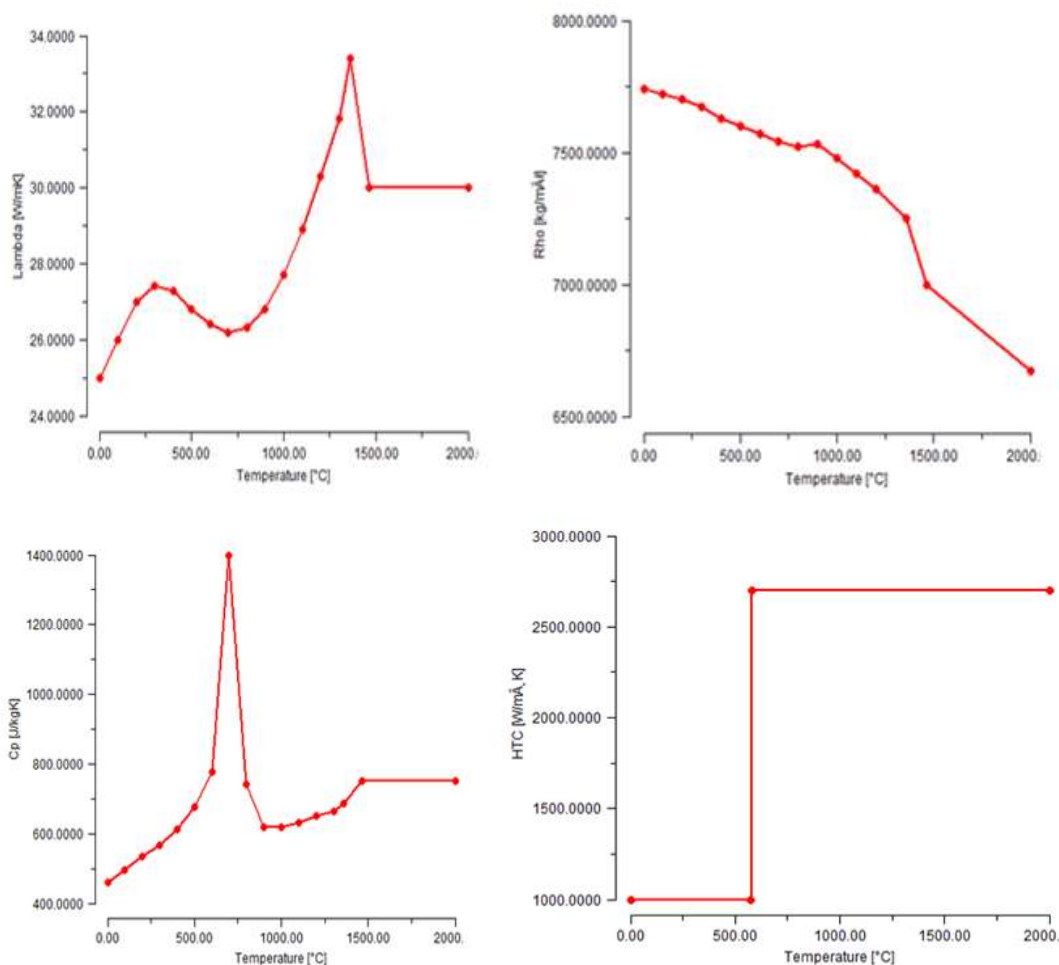


Obr. 7-4 Závislosti tepelně – fyzikálních veličin pískové slévárenské formy použité při simulaci gravitačního lití z LLG řešené v této práci (tepelnou vodivost, hustotu, měrnou tepelnou kapacitu a koeficient přestupu tepla)

Pro porovnání použitých závislostí jsou na obr. 7-5 uvedeny stejné tepelně – fyzikální veličiny jako na obr. 7-4, ale tentokrát optimalizovány pro běžnou ocelovou formu.

Pro verifikaci získaných dat a křivek tepelně – fyzikálních veličin je před každou simulací vhodné porovnat zkušební simulaci na odlitku jednoduchého tvaru. Na našem pracovišti je zvykem ověřovat tepelně - fyzikální veličiny na odlitcích jednoduchého deskového nebo válcového charakteru. Proto byla provedena experimentální simulace gravitačního lití do pískové formy na odlitku jednoduchého deskového charakteru. Současně byla reálně odlita stejná forma ze stejné slitiny. Reálná forma byla osazena termočlánky určené pro měření teplotních polí. Výsledky získané reálným měřením pak porovnáním ověřeny se zkušební simulací ve specifických předem vybraných místech

a časech. Z výsledků se zakreslily křivky a sledovali jsme shodu křivek na reálném odlitku v porovnání se simulací.



Obr. 7-5 Závislosti tepelně – fyzikálních veličin ocelové slévárenské formy použité při simulaci gravitačního lité z LLG řešené v této práci (tepelnou vodivost, hustotu, měrnou tepelnou kapacitu – cp a koeficient přestupu tepla)

7.2 Příprava a průběh simulačního výpočtu procesu lité v programu MAGMA 5

Pro simulační výpočty lité litinových písních kroužků do pískové formy bylo řešeno 6 variant simulací dle rozdílné lité teploty a dle nastavení parametrů prodyšnosti použité bentonitové směsi. V této práci budu prezentovat 2 varianty s použitou maximální a minimální teplotou, první varianta s lité teplotou 1470°C (dále jen varianta 1), druhá varianta s lité teplotou 1420°C (dále jen varianta 2), ostatní parametry byly

u obou variant stejné. Tento teplotní interval je během reálného lití způsoben tím, že na jednu lící pánev slévači odlíjí více forem najednou. Díky tomu dochází k poklesu teploty až k výše zmiňované teplotě 1420°C. V rámci přípravy první fáze simulačního výpočtu bylo nutné založit nový projekt v němž byl následně simulační výpočet prováděn. Aby byl daný projekt vytvořen, bylo třeba specifikovat typ procesu a typ slitiny, zde se jednalo o gravitační proces lití do pískové formy a typem slitiny byla litina. Dále probíhalo definování simulace v jednotlivých částech simulačního programu resp. modulech.

Do nového projektu byly importovány modely vtokové soustavy, odlitku a nálevky. Modely byly připraveny v externím 3D modeláři. Po importu bylo nezbytně nutné zkontrolovat dodržení hlavní zásady a to té, že osa Z reprezentuje směr působení gravitace a software Magma5 s tímto ve svém matematickém jádru počítá tzn. že směr gravitace je opačný než kladný směr osy Z. Pokud toto vytvořený model nesplňuje, je nutné přímo v této perspektivě model dodatečně natočit do požadované polohy. Následovalo vytvoření formy přímo v modeláři Magma⁵ pomocí funkce CUBE.

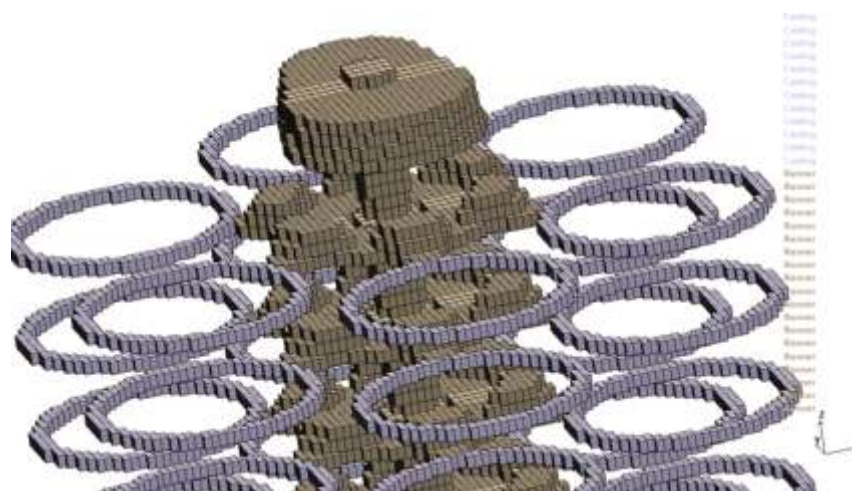
Jednotlivým geometrickým prvkům (forma) pak bylo nutné přiřadit jejich materiálovou skupinu. Poslední velice důležitou věcí v této perspektivě bylo nadefinování tzv. inletu. Inlet charakterizuje proud kovu a místo kterým vstupuje tekutý kov do dutiny formy. Nevhodné stanovení inletu dokáže naprosto zničit výsledky celé simulace a snížit její kvalitu.

Do inletu byly nastaveny tzv. trasovací částice, které umožňují sledování a vyhodnocování charakteru plnění. V tomto případě bylo použito 36 trasovacích bodů v rozložení nazývaném „rectangular“, které rovnoměrně body rozloží po povrchu inletu.

Dalším velmi důležitým krokem bylo vytvoření výpočtové sítě tzv. meshing.

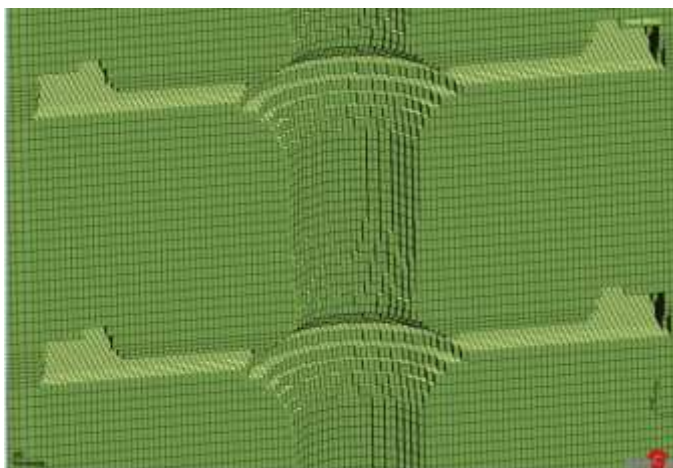


Obr. 7-6 Část modelu s optimálně vytvořenou výpočetní sítí (vpravo detail na jednotlivé písní kroužky)



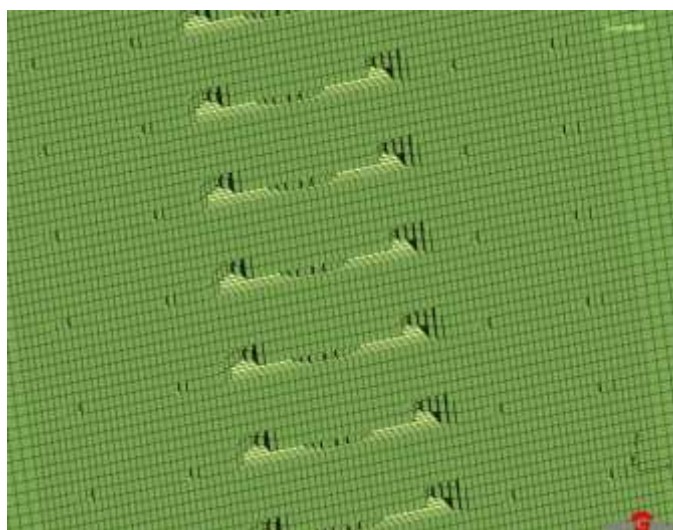
Obr. 7-7 Špatné vytvořená síť (na výšku pístního kroužku je pouze jeden element což je nedostatečné)

Hustota sítě ovlivňuje detailnost vykreslení tvaru odlitku a tím také kvalitu výpočtu. S větším počtem elementů (v tomto případě krychliček) na druhou stranu roste čas nutný pro výpočet. Hledal jsem tedy určitý kompromis mezi vhodnou hrubostí sítě a počtem elementů v nejmenší části formy. Z tohoto důvodu bylo nutné nadefinovat jednotlivé prvky geometrie různými hustotami výpočtové sítě viz obr.7-6. Prvkům geometrie s nižší prioritou síť hrubší, a naopak problematickým prvkům geometrie a částem, které nás více zajímají nastavit síťování jemnější. Z tohoto důvodu zde byla použita metoda tvorby sítě pomocí skupin parametrů. Samotné zasíťování pro jednotlivé části pak bylo provedeno metodou ekvidistantní buňky, která je založena na pokročilých síťovacích kritériích a umožňuje vytvořit síť s elementy s různým rozlišením pro jednotlivé směry souřadného systému. Pro skupinu standard bylo nastaveno $X = 1$, $Y = 1$, $Z = 1,5$, pro skupinu odlitky $X = 0,8$, $Y = 0,8$, $Z = 0,7$. Po vytvoření sítě bylo třeba ověřit její kvalitu, pomocí funkce nazvané kvalita sítě – „Mesh Quality“. Výsledek této funkce pak specifikuje, kde a kolik elementů v síti nebylo nasíťováno ideálně a bylo nutno opravit a doladit. Tento odlitek je problematický pro síťování právě díky malým rozměrům jednotlivých pístních kroužků v porovnání s celkově velký objemem formy. Obr. 7-7 zobrazuje velmi hrubou síť, která je pro simulaci nedostačující. Na výšku jednoho odlitku připadá pouze jeden element. Obr. 7-8 a 7-9 zobrazují finální zasíťování licího kůlu a zářezů.



Obr. 7-8 Detail zasít'ování dutiny vtokové soustavy ve formě

Posledním krokem v části týkající se výpočtové sítě, bylo zapnutí funkce Solver 5, díky níž je ve výpočtu plnění dutiny formy uvažováno povrchové napětí proudící taveniny. V porovnání s první variantou sítě, která obsahovala cca 2 miliony elementů a díky tomu velké množství chyb sítě, měla finální síť přes 105 milionů elementů.



Obr. 7-9 Detail zasít'ování dutiny vtokové soustavy ve formě

Dále se v dalším modulu zadaly nezbytné procesní parametry (materiály formy, odlévané slitiny, koeficientu přestupu tepla mezi všemi součástmi a celkově bylo nutno nastavit proces lití).

Z databáze byla pro odlitek vybrána šedá litina GJL – 150, avšak bylo upraveno její chemické složení tak, aby odpovídalo reálným hodnotám použité slitiny. Spolu s materiálem zde byla definována počáteční lící teplota, která byla pro variantu 1 nastavena na 1470°C, pro variantu 2 na 1420°C. Pro formu byla z databáze vybrána jednotná bentonitová formovací směs Green sand, u které byly opět upraveny její vlastnosti (vlhkost, prodyšnost atd.), podle reálných hodnot, které byly stanoveny

průměrem z několika měření. Počáteční teplota formy pak byla nastavena na 30°C. Pro materiál nálevky byl vybrán materiál dle reálného stavu GJL – 200.

Dalším krokem bylo nastavení samotného procesu lití, kde se jako první charakterizovalo chování litiny a to jak je litina očkovaná, zde byla zvolena možnost good. Poté bylo nutno nadefinovat plnění formy a to pomocí doby lití, která byla nastavena na 20s, je však možné plnění zadat i jinými způsoby. Tuhnutí pak bylo zadáno tak, že skončí, až proběhnou všechny přeměny. Též bylo nutné nastavit, že odlitek byl vytloukán z formy po 10 minutách po odlití, k čemuž nám posloužila funkce nazvaná Shake out.

Tím byl nastaven celý proces lití a zbývalo pouze nadefinování požadovaných výsledků. Některé výsledky software poskytuje pokaždé, jiné si musí uživatel vybrat sám zaškrtnutím daného okna případně nastavit interval ukládání dat pro příslušnou požadovanou veličinu.

Posledním krokem bylo samotné spuštění simulačního výpočtu. Zde se nadefinoval počet výpočetních jader procesoru počítače, které byly uvolněny z kapacity výpočetního PC pro samotný výpočet. Využití počtu výpočetních jader souvisí s variantou licence tohoto softwaru. Katedra strojírenské technologie při TU v Liberci má v tuto chvíli k dispozici licenci na 4 výpočtová jádra. Pak už se pouze pomocí tlačítka Start spustil výpočet varianty 1, to stejné následovalo i pro variantu 2. Nutno podotknout, že délku výpočtu ovlivnila zejména velká jemnost sítě. Výpočetní síť obsahovala přes 105 milionů elementů. Toto rozlišení však bylo nutné z důvodů správného nasítování odlitků a zářezů, které jsou velmi tenké. Obvyklejší odlitek s mnohem menší hustotou sítě, např. jednoduššího tvaru a také menší velikosti je obvykle zpočítán do druhého dne. Výpočet každé varianty v konečném stavu sítě trval cca 14 dní.

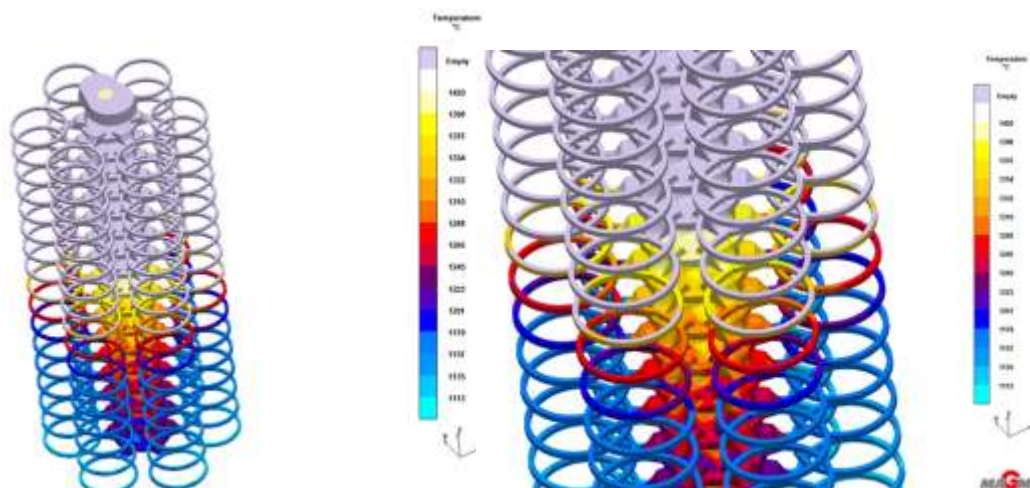
7.3 Vyhodnocení simulace licího procesu v programu MAGMA 5

Po dokončení simulačního výpočtu byla otevřena perspektiva pro vyhodnocování výsledků nazývaná “*Result Perspective*“. Celkový seznam všech výsledků simulačního výpočtu je rozdělen do tří hlavních skupin, kterými jsou výsledky plnění, výsledky tuhnutí a chladnutí a procesní křivky. Pro správnou interpretaci výsledků simulačního výpočtu je pak důležité sladit dohromady nastavení barevné stupnice a funkce rentgenu (Xray), který nám umožňuje pohled i do nitra odlitku.

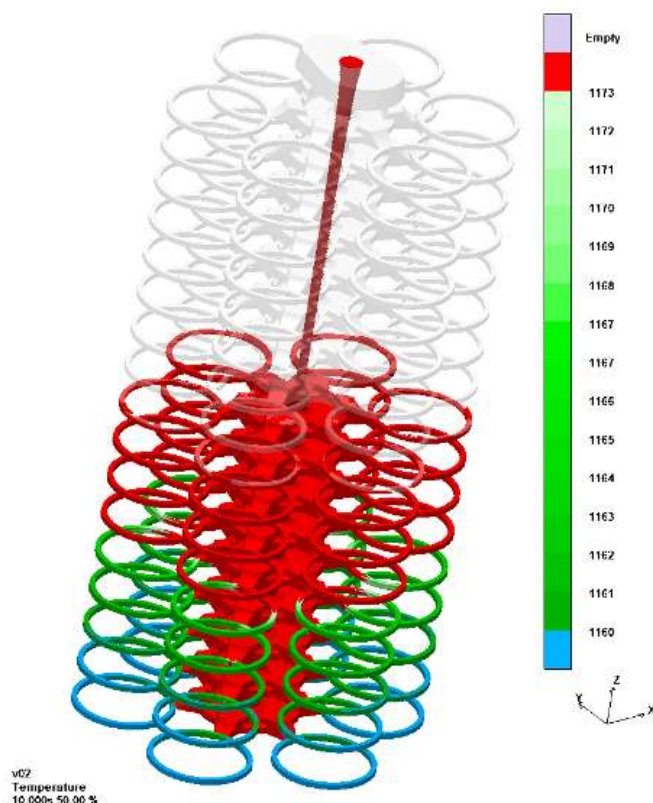
Mezi výsledky plnění patří teplotní pole, rychlostní pole, tlaky, uzavřený vzduch, přetlak vzduchu a trasovací částice. Předprogramovaná kritéria pak zahrnují kontakt se vzduchem, dráhu, kterou tavenina urazila během plnění, stáří kovu, styk kovu se stěnou formy, čas plnění, eroze pískové formy atd.

Všechny výsledky a kritéria byli prostudovány a následuje jejich výčet. Vyhodnocení je pak provedeno u těch kritérií, která byla pro tuto práci přínosná.

Teplotní pole “*Temperature*“ popisuje teplotní pole uvnitř vybrané materiálové skupiny v každém časovém intervalu během plnění. Toto kritérium bylo vhodné sledovat z důvodu, zda teplota během plnění neklesá pod teplotu likvidu, což je nežádoucí. Třeba i pouze jen v některých místech. Teplotní pole jsou zobrazovány na barevné stupnici v °C. Na obr. 7-10 je zobrazeno teplotní pole v čase 10s, tedy v polovině celkového času plnění, 50% zaplnění formy. Na obr. 7-11 je dobře vidět vliv etážové lití, kdy kroužky označené červenou barvou mají ještě dostatečně vysokou teplotu a kov je zde tekutý. Zelené kroužky již natuhávají. Modré jsou již ztuhlé.

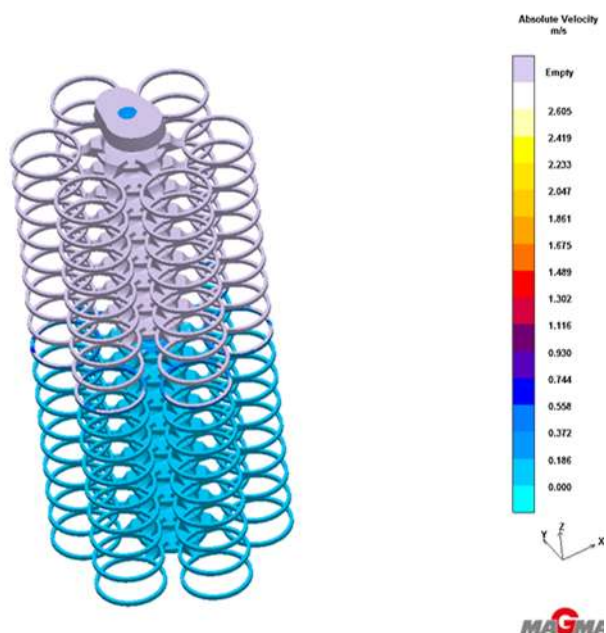


Obr. 7-10 Výsledek simulace plnění formy v čase 10s od počátku lití
(50% zaplnění formy)(vpravo detail)



Obr. 7-11 Výsledek simulace plnění formy v čase 10s od počátku lití (50% zaplnění formy) (nastavení barevné škály pro sledování tekuté a tuhé fáze)

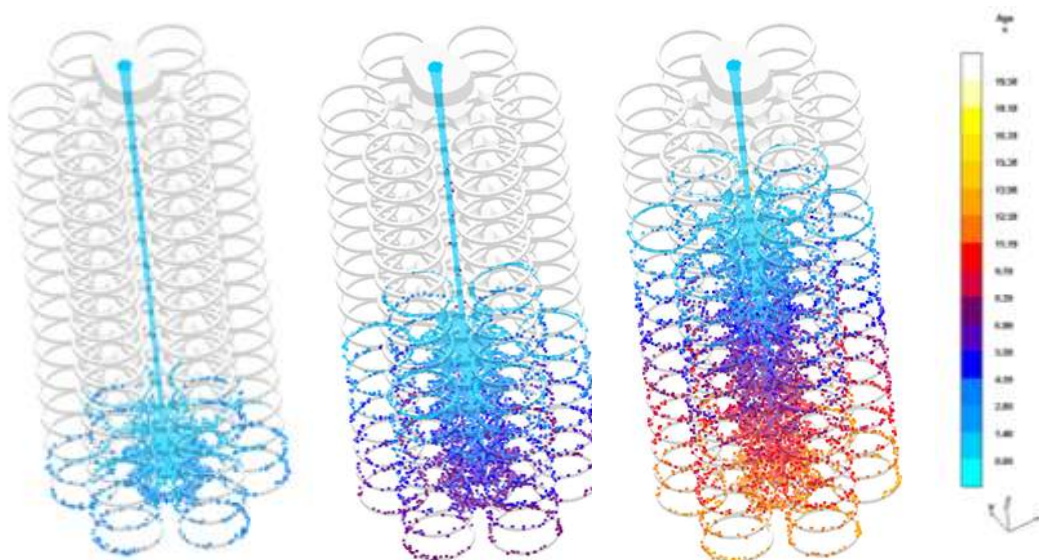
Rychlostní pole “*Velocity*“ popisuje rychlosti, kterými se pohybuje proudící tavenina v jednotlivých časových intervalech během plnění viz obr. 7-12. Na základě toho kritéria je možné například určit kde je rychlost taveniny příliš vysoká a tím může docházet k vymílání formy, nebo kde vlivem velké rychlosti dochází k rozstříku taveniny. Pro běžné bentonity se uvádí kritická rychlost nad 2 m/s.



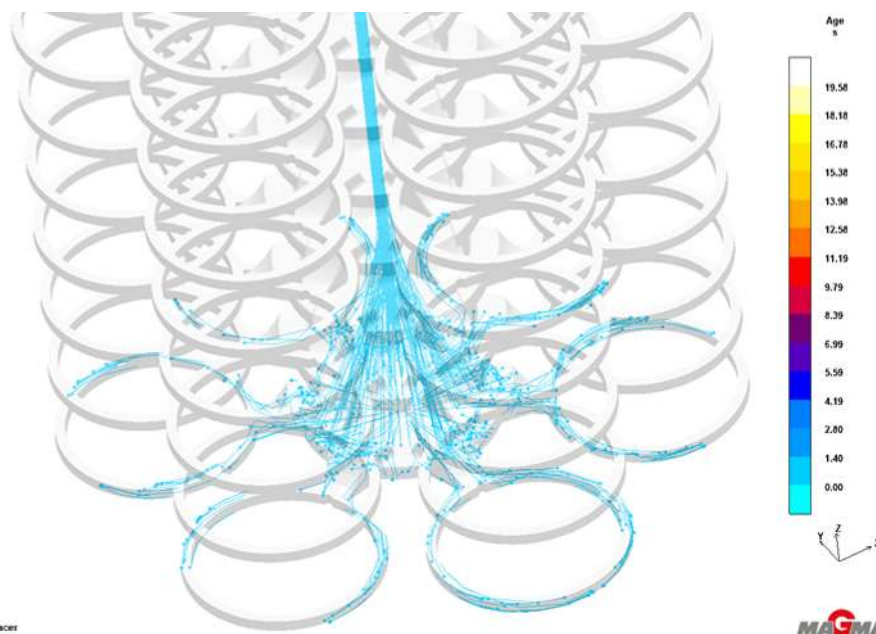
Obr. 7-12 Výsledek simulace rychlostních polí v čase 10s od počátku lití
(50% zaplnění formy)

Tlak “*Pressure*“ zobrazuje rozložení tlakových polí během plnění v různých časových intervalech. Tlak je zobrazován na barevné stupnici v mbar.

Trasovací částice “*Tracer*“ jsou zobrazovány jako animace. Je jimi možno monitorovat pohyb simulovaných částic uvnitř taveniny. A to hmotných (s nějakou konkrétně nastavenou hustotou) tak i nehmotných (virtuálních). Hmotné částice mohou simulovat částice strusky nebo jiné drobné nečistoty, pokud se do taveniny pravidelně dostávají během reálného lití v provozu. Trasovací částice se pohybují uvnitř taveniny v závislosti na jejich nastavených hmotnostních parametrech. Díky tomu je možno zachytit vlastnosti a chování taveniny nejen na povrchu, ale také již zaplněných oblastí formy. Díky nim je možné zjistit, kde může docházet k turbulenci taveniny případně jiným problémům jako např. zahlcený vzduch. Barevná škála v tomto režimu nezobrazuje teplotní pole, ale „stáří“ (*Age*) taveniny v daném místě, tedy jak dlouho je daná část taveniny ve formě viz obr. 7-13 a 7-14. Díky této funkci můžeme predikovat mísení např. taveniny která vtekla do dutiny formy jako první s částí taveniny, která byla plněna až na konci procesu lití. Budou tedy mít odlišnou teplotu, hustotu a na rozhraní těchto rozdílných fází může dojít ke vzniku vad.



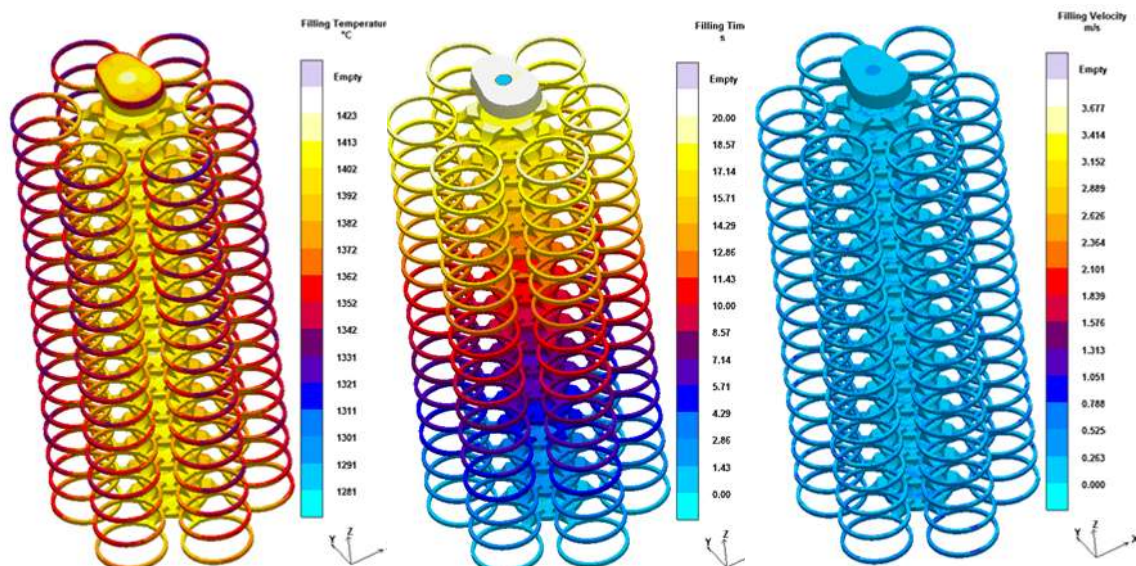
Obr. 7-13 Monitorizace pohybu trasovacích částic v tavenině



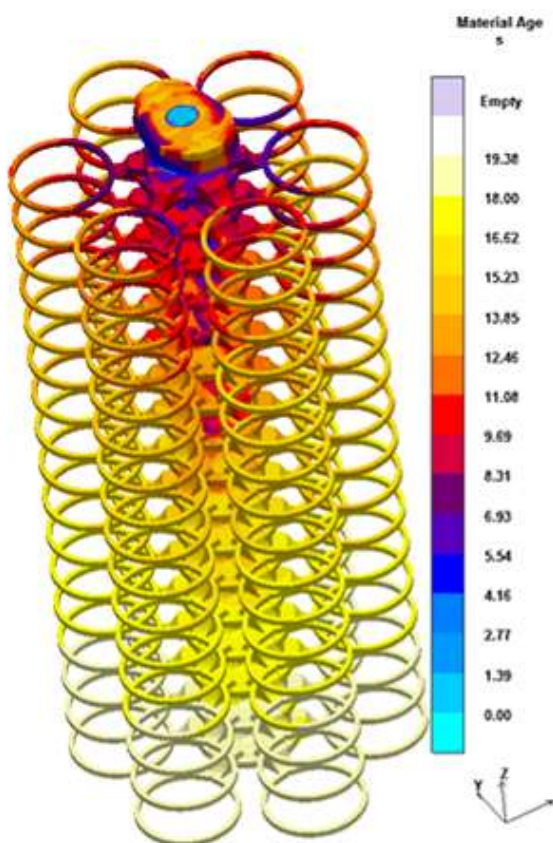
Obr. 7-14 Monitorizace pohybu trasovacích částic v tavenině (detail počátku lití)

V položce výsledků “*General Criteria*“ jsou uložena následující čtyři kritéria:

Teplota při plnění “*Filling Temperature*“ ukazuje teplotu, kterou měla tavenina kovu v prvním okamžiku kontaktu s formou. Tato teplota by neměla klesnout pod teplotu likvidu. Teplota likvidu je v tomto případě 1173 °C.



Obr. 7-15 Výsledky simulace v čase 20s od počátku lití , 100% zaplnění formy, (zleva: parametr rozložení teplot (filling temperature), čas naplnění daného místa (filling time), rychlost plnění (filling velocity),



Obr. 7-16 Výsledky simulace v čase 20s (parametr Material Age, 100% naplnění)

Z detailních analýz teplot je patrné, že u varianty 1 má teplota při plnění minimální hodnotu 1346°C, u varianty 2 je to pak 1314°C. Obě tyto minimální teploty jsou tedy poměrně vysoko nad teplotou likvidu.

Čas plnění "*Filling Time*" zobrazuje čas plnění jednotlivých oblastí formy. Čas plnění je zobrazován na barevné stupnici v s. Z výsledků tohoto kritéria vyplývá, že jedno patro odlévaných pístních kroužků se u obou variant plní v průměru 0,94s. Nejdéle potom trvá plnění spodního patra, u varianty 1 to je 1,028s, u varianty 2 je to 2,02s.

Rychlost při plnění "*Filling Velocity*" zobrazuje rychlost proudu taveniny v okamžiku prvního kontaktu v daném místě. Rychlost při plnění je zobrazována na barevné stupnici v m/s.

Tato kritéria na sledovaném vzorku popisují obrázky 7-15 a 7-16.

Rozložení pískových vměstků "*Sand Inclusion Area Fraction*" je zobrazeno pouze na povrchu odlitku a ukazuje oblasti, kde je možné očekávat usazení vyplavených pískových nečistot. Rozložení pískových vměstků je zobrazováno na barevné stupnici v %. Zde žádné takové oblasti nebyli predikovány. Přetlak vzduchu – v softwaru označený názvem "*Air Pressure*" měří a zobrazuje maximální tlak vzduchu, který se v jednotlivých časových intervalech nacházel ve výpočetních elementech. Z detailních analýz je patrné, že zde nejsou tlaky nijak extrémní, pouze v místech nárazu proudů jsou vyšší a v těchto místech je zvýšené riziko vzniku bublin, případně jiných podobných vad.

Zahlcený vzduch "*Air Entrapment*" je kritérium pro vzduchové bubliny. Počítá a zjišťuje koncentraci plynu v tavenině díky uzavírání vzduchu, ke kterému dochází během plnění vlivem turbulence. Toto kritérium primárně slouží k vyhodnocení odvzdušnění forem. Pomocí tohoto kritéria byly zjištěny oblasti s množstvím zahlceného vzduchu vyšším než je 15%, což může být problémové. V některých oblastech zahlcený vzduch stoupá dokonce až nad 25%, což je hraniční hodnota, za kterou by se zahlcený vzduch neměl dostat.

Kontakt se vzduchem "*Air Contact*" počítá průměrnou dobu, kdy byl povrch taveniny během plnění v přímém kontaktu se vzduchem. Jednotlivé elementy s vysokými hodnotami tohoto kritéria jsou ty, ve kterých mají oxidické blány nejdelší čas a nejlepší podmínky pro svůj růst.

Stáří kovu “*Material Age*“ určuje průměrný věk taveniny v každém zaplněném elementu. Při vstupu taveniny do vtokového kůlu je stáří kovu nula. Promíchávání uvnitř a na povrchu taveniny ovlivňuje hodnotu tohoto kritéria pro jednotlivé výpočetní elementy. Elementy s nízkou hodnotou tohoto kritéria jsou mladší než ty s vyšší hodnotou. Stáří kovu je na barevné stupnici zobrazováno v sekundách.

Dráha kovu od vstupu do formy “*Flow Length*“ zobrazuje vzdálenost, kterou urazí tavenina od svého vstupu do vtokového kůlu. Tyto výpočty jsou provedeny integrováním rychlostních polí za čas v každém časovém kroku. Tato informace je následně předána dál, což znamená, že promíchávání v tavenině ovlivní hodnotu tohoto kritéria pro každý výpočetní element. Dráha kovu od vstupu do formy je zobrazována na barevné stupnici v mm.

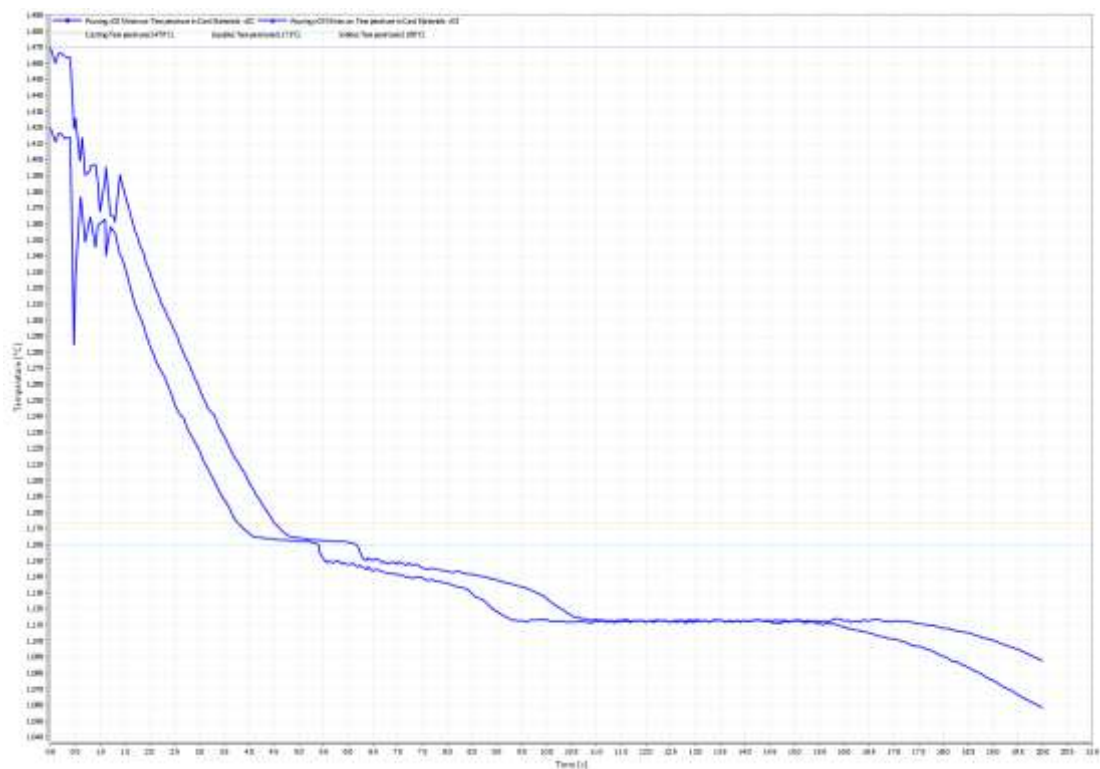
Kontakt taveniny se stěnou formy “*Wall Contact*“ vypočítává dobu, po kterou byla tavenina ve styku se stěnou formy. Promíchávání uvnitř a na povrchu taveniny ovlivňuje hodnotu tohoto kritéria pro jednotlivé výpočetní elementy. Tavenina, která byla po určitou dobu v kontaktu se stěnou, může být zanesena do hlavní části odlitku a zde zvyšovat hodnoty místní taveniny. Kontakt taveniny se stěnou formy je na barevné stupnici zobrazován opět v sekundách.

Eroze pískové formy “*Mold Erosion*“ predikuje erozi povrchu pískové formy (pískových jader) díky příliš vysoké rychlosti taveniny, která na danou pískovou stěnu naráží po určité době.

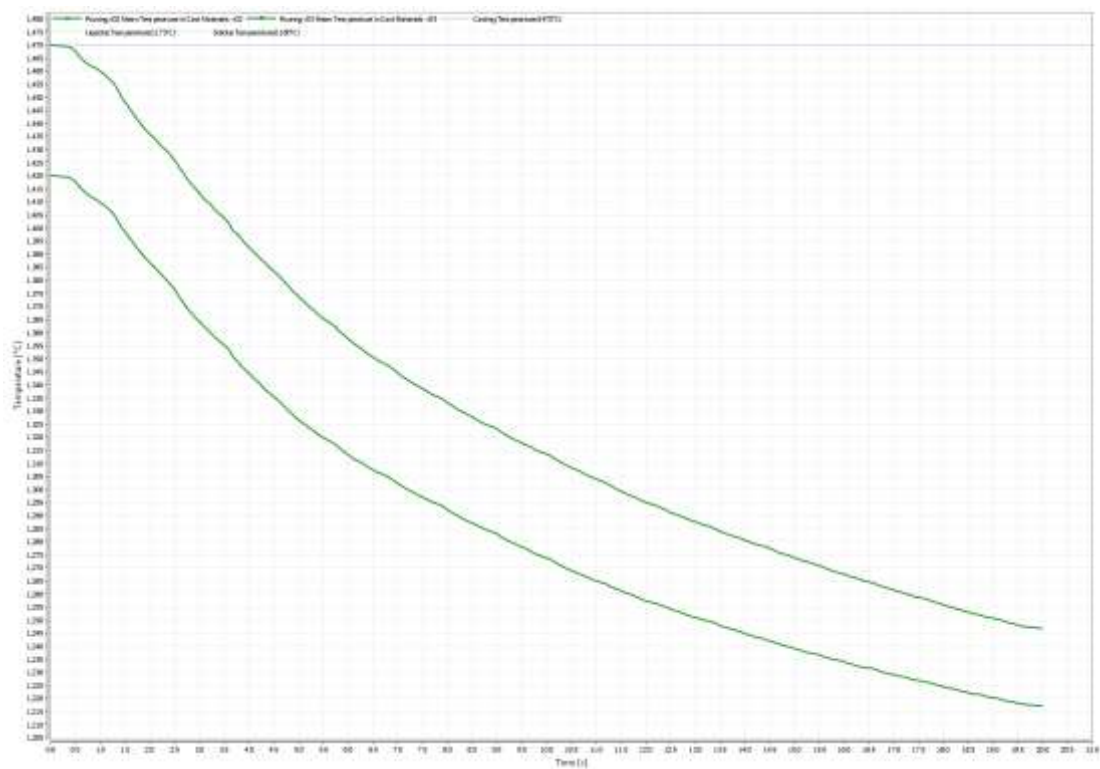
Výsledky simulačního výpočtu plnění formy obsahují, kromě výše uvedených kritérií, i několik procesních křivek „*Curves*“. Mezi tyto křivky patří křivka zaplnění („*Percent Filled*“), křivka vývinu tlaku („*Air Pressure*“), křivky minimální, střední a maximální teploty v odlévaném materiálu („*Minimum, Mean, Maximum Temperature in Cast Materials*“).

Na obr. 7-17 jsou znázorněny křivky minimálních teplot v odlévaném materiálu pro obě varianty. V ideálním případě by křivka neměla klesnout pod teplotu likvidu, zde však pod tuto teplotu klesá vlivem natuhávání spodních odlitků. K tomu dochází díky malým rozměrům odlitků a etážovému lití, kdy je v tomto případě forma poměrně vysoká. V reálu tedy malé odlitky v prvních patrech jsou již natuhlé a vrchní patra neobsahují ještě žádný kov.

Na obr. 7-18 jsou znázorněny křivky středních teplot v odlévaném materiálu pro obě varianty. Zde by opět neměla křivka klesnout pod teplotu likvidu, což je zde splněno.



Obr. 7-17 Křivky minimálních teplot v odlévaném materiálu



Obr. 7-18 Křivky středních teplot odlévaného materiálu

7.4 Výsledky simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí v programu MAGMA 5

Druhá fáze výsledků po naplnění formy souvisí s parametry tuhnutí a chladnutí odlitků. Mezi výsledky tuhnutí a chladnutí patří teplotní pole, podíl tekuté a tuhé fáze, mikrostruktura, materiálové vlastnosti a informace o dosazovací schopnosti. Do jednotlivých kritérií, nacházejících se ve složce obecná kritéria, patří například vnitřní zdravotnost odlitku, objemové staženiny, teplotní moduly, teplotní uzly, čas kdy odlitek přestává dosazovat objemově atd. Všechny výsledky a kritéria byly prostudovány a následuje jejich výčet. Vyhodnocení je pak provedeno u těch kritérií, která byla pro tuto práci přínosná. Pro připomenutí varianta 1 je s vyšší teplotou lití a to 1470°C, varianta 2 je pak s nižší teplotou lití a to 1420°C.

Teplotní pole “*Temperature*“ popisuje rozložení teplotních polí ve všech oblastech vybraných materiálových skupin v každém časovém intervalu během tuhnutí odlitku. Teplotní pole jsou zobrazovány na barevné stupnici v °C. V této práci bylo toto kritérium využito k zobrazení degradované formovací směsi, viz kapitola 8.3 byla zobrazena písková forma po ztuhnutí odlitku.

Tekutá fáze “*Fraction Liquid*“ ukazuje místní podíl tekuté fáze ve všech časových krocích během tuhnutí odlitku. Barevná stupnice ukazuje v jakých místech je kolik procent tekuté fáze. V tomto kritériu je z výsledků patrné že je u varianty 1 podíl tekuté fáze 91,65% a u varianty 2 89,42%. K dosažení 0% tekuté fáze ve všech místech odlitku, tedy k jeho 100% ztuhnutí, došlo u varianty 1 v čase 183,070s, u varianty 2 v čase 172,502s.

Kritérium tuhé fáze “*Fraction Solid*“ ukazuje místní podíl tuhé fáze ve všech časových krocích během tuhnutí odlitku. Podíl tuhé fáze je na barevné stupnici zobrazován v %. Je to v podstatě opak předchozího kritéria.

Vnitřní zdravotnost odlitku “*Soundness*“ patří do skupiny obecných kritérií – “*General Criteria*“. Zobrazuje místní podíl taveniny na konci tuhnutí, a tudíž lze posoudit kvalitu dosazování uvnitř odlitku. Vnitřní zdravotnost odlitku je na barevné stupnici zobrazována v %. 100% zdravotnosti odlitku odpovídá 0% staženin a naopak.

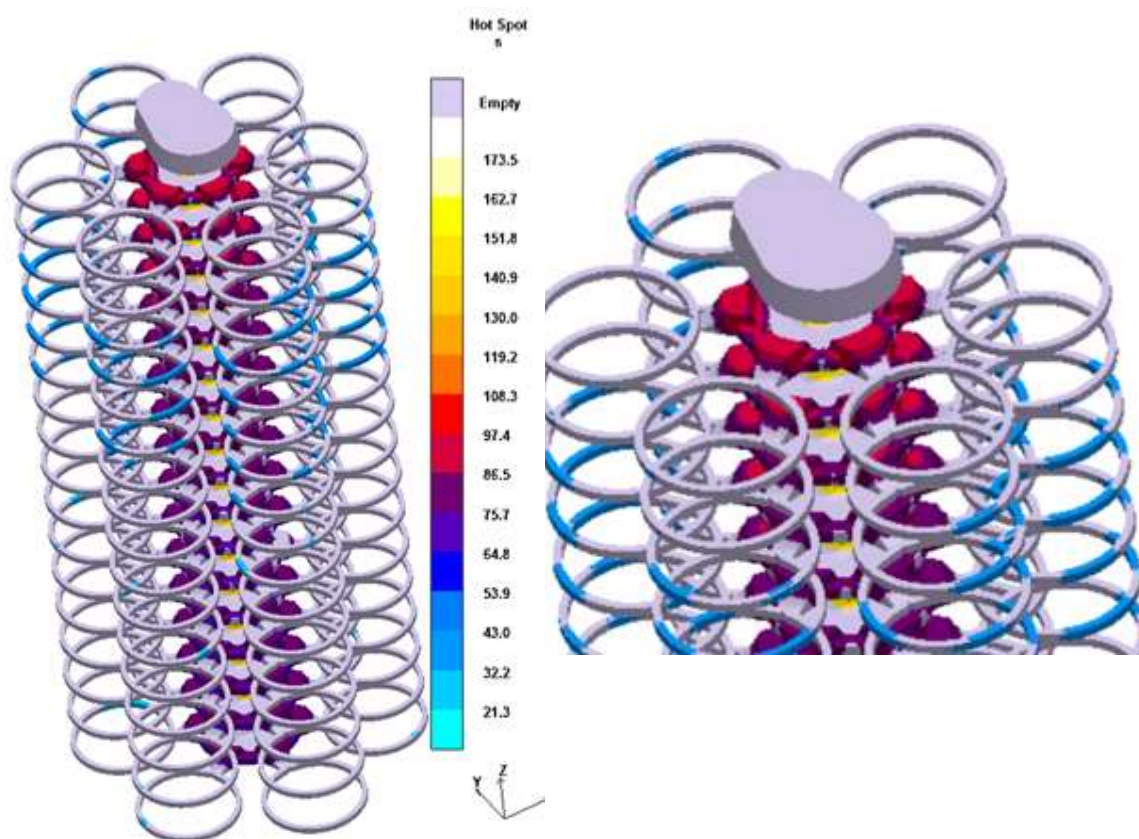
Niyamovo kritérium “*Niyama Criterion*“ slouží pro posouzení vzniku a přítomnosti ředin a staženin v teplotních osách ocelových odlitků. Pro hodnocení litiny se tedy nepoužívá a tudíž ani zde nebylo hodnoceno.

Teplotní modul “*Feedmod*“ pomůže stanovit teplotní podmínky uvnitř odlitku a vhodně umístit a nadimenzovat nálitky. Zároveň díky tomuto kritériu lze ověřit míru usměrněného tuhnutí v odlitku. Teplotní modul je na barevné stupnici zobrazován v cm.

Doba tuhnutí “*Solidifaciton Time*“ zobrazuje, jak dlouho tuhla jednotlivá místa v odlitku.

Solidus a Likvidus “*Liquidus to Solidus*“ znázorňuje čas za kterou se kov v dutině formy dostal z teploty Likvidu na teplotu Solidu.

Teplotní uzel “*Hot Spot*“ je kritérium zobrazující oblasti, jejichž časy tuhnutí jsou značně odlišné od jejich okolí. Jinými slovy s pomocí teplotních uzlů jsou odhaleny oblasti, kde je zbytková tavenina plně obklopena chladnějším materiálem. V těchto místech pak hrozí vznik objemových staženin díky nedostatečnému dosazení tekutým kovem.



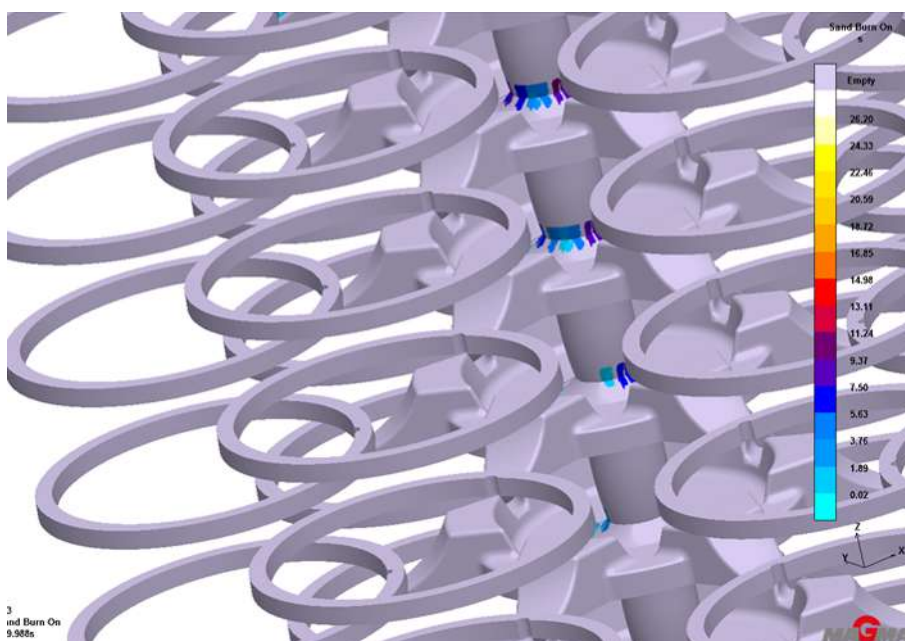
Obr. 7-19 Objemové staženiny v odlitku (Hot Spot)

Dle výsledků viz obr. 7-19 je patrné, že vyšší riziko vzniku objemových staženin je v horních částech formy vyznačených světle modrou barvou.

Dalším sledovaným kritériem je čas, kdy odlitek přestává dosazovat objemově “*FSTime*“. Toto kritérium indikuje čas, který odlitek potřebuje pro dosažení kritického poměru tuhé fáze, aby bylo objemové dosazování zastaveno. Jinými slovy, v tento daný moment přestává odlitek dosazovat objemově a pokračuje v dosazování pouze mezi dendrity tuhé fáze. Důležitým parametrem pro tuto predikci je dosazovací schopnost, “*Feeding Effectivity*“. Tato hodnota v % je závislá na typu slitiny a její morfologii a vyjadřuje schopnost odlitku objemově dosazovat pouze do dosažení určitého % tuhé fáze. Potom odlitek již není schopen dobře dosazovat a v izolovaných “ostrůvcích“ zbytkové taveniny se začnou tvořit staženiny.

Kritérium Gradient “Gradient “ zobrazuje rychlost přenosu tepla přes objemovou jednotku. Gradient je zobrazen na barevné stupnici v °C/mm. Rychlost ochlazování “Cooling Rate“ zobrazuje rychlost ochlazování v jednotlivých částech formy. Rychlost ochlazování je zobrazena na barevné stupnici v °C/s.

Kritérium připečeníny “*Sand Burn On*“ zobrazuje místa, ve kterých se mohou připečeníny vyskytovat. Připečeníny jsou zobrazeny na barevné stupnici v sekundách. Připečeníny lze dobře pozorovat díky zobrazovací funkci programu Magma5 rentgenu (Xray).



Obr. 7-20 Kritérium připečení (Sand Burn On)

V tomto případě je predikován výskyt připečení převážně ve vtokové soustavě u lícího kůlu viz obr. 7-20, což nijak neovlivňuje kvalitu odlitků. V horní části formy se pak mohou drobné připečeníny vyskytnout i v místě zářezu.

Kritérium penetrace taveniny do pískové formy s názvem “*Sand Penetration*“ zobrazuje místa, ve kterých tavenina proniká mezi zrna formovací směsi.

Rychlost tuhnutí “*Solidifaciton Rate*“ je kritériem zobrazující rychlosti tuhnutí v jednotlivých místech odlitku. Rychlost tuhnutí je zobrazena na barevné stupnici v °C/s.

Velmi důležité je kritérium objemových staženin “*Porosity*“ zobrazující objemové staženiny uvnitř odlitku po ukončení fáze tuhnutí. Na barevné stupnici je toto kritérium v %. 0% znamená naprosto zdravý odlitek, 100% znamená zcela porézní odlitek. Modré plochy znázorňují místa možného vzniku pórů, nejvíce se objevují v odlitcích ve vrchní polovině formy, viz tab.7-2. Hodnoty porozity byly shrnuty do tabulky 7-2, ze které je patrné, že porozita je o něco vyšší u varianty 2, i tak ale její hodnoty nejsou nijak vysoké. Na obr. 7-21 je pak možné vidět porozitu ve vybraných patrech formy (modré oblasti).

Tabulka 7-2 Hodnoty porozity v jednotlivých patrech 17-ti etážové formy

Porozita [%]									
Patro č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Varianta 1	0,420	0,889	1,584	3,046	2,590	1,853	1,733	2,431	2,026
Varianta 2	1,051	1,398	2,023	2,068	2,338	2,222	1,854	2,893	2,684
Patro č.	10	11	12	13	14	15	16	17	
Varianta 1	1,816	2,045	1,648	1,258	1,872	1,394	1,431	0,973	
Varianta 2	2,294	2,231	1,943	1,182	1,965	1,849	1,596	1,200	

V rámci ešení simulací je dále možno sledovat např. mikrostruktury v rámci modulu “*Microstructure*“. Tento modul obsahuje několik kritérií týkajících se mikrostruktury. Patří sem velikost eutektických buněk (“*Eutectic Cell Size*“), podíl podchlazeného grafitu (“*Undercooled Graphite*“), podíl austenitu (“*Fraction of Austenite*“), podíl eutektické fáze (“*Fraction of Eutectic Phase*“), vzdálenost lamel (“*Lamellar Spacing*“) a zákalka (“*White Solidification*“).

Materiálové vlastnosti “*Material Properties*“ dále obsahují tři kritéria, které znázorňují hodnoty materiálových vlastností v různých místech odlitku. Prvním kritériem je minimální pevnost v tahu (“*Minimum Tensile Strenght*“), druhým je Youngův modul (“*Young’s Modulus*“) a třetím je tvrdost (“*Hardness Pearlitic*“). Tyto vlastnosti byly řešeny v rámci této simulace také, ale pro velký objem dat a zaměření této práce bude tato problematika řešena samostatně v rámci odborného článku. Proto je zde neuvádím. V rámci této práce se zaměřuji především na sledování degradace bentonitu a jeho metody oživení na základě simulačních výpočtů viz kapitola 8 a 8.3.

7.5 Porovnání vad zjištěných simulačními výpočty a vad na reálných odlitcích

Vada odlitku je všeobecně každá odchylka vzhledu, tvaru, rozměru, hmotnosti, makrostruktury a laboratorními zkouškami zjištěná odchylka vlastností od příslušných norem nebo technických podmínek.

Při řešení každé slévárenské vady vidíme význam a vliv propojení jednotlivých slévárenských profesí, předvýrobních etap s vlastní výrobou. Dokonalý technologický postup může být zcela znehodnocen nekvalitní prací formíře nebo jádraře, stejně jako vyrobením nekvalitní směsi, přípravou tekutého kovu, způsobu lití atd. Nutná je také spolupráce slévárenských techniků s konstruktéry při posuzování technologičnosti konstrukce, jelikož mnoho příčin vad pramení už z konstrukce odlitku. Je tedy mnoho důležitých faktorů ovlivňujících kvalitu výrobku. Každý druh, či typ odlitku je určen k jiným pracovním účelům. S tím je spjato i ustanovení příslušných norem nebo technických podmínek, podle kterých může být stejná vada někdy přípustná, jindy nepřípustná popřípadě opravitelná nebo odstranitelná.

Nepřípustná vada je odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, kterou nelze odstranit opravou nebo jejíž oprava je podle dokumentace nepřípustná, protože činí odlitek z funkčního hlediska nepoužitelným.

Přípustná vada je vada, kterou příslušné normy nebo technické podmínky připouštějí, aniž by požadovali její odstranění výrobcem odlitku.

Odstranitelná vada je odchylka na odlitku od příslušných norem nebo technických podmínek, kterou je dovoleno podle těchto předpisů odstranit vhodným způsobem po dohodě s odběratelem odlitku, a to zvláštními úpravami a nepředpokládanými výrobními postupy. Vady odlitků mohou být dále zjevné a skryté. Zjevná vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku vizuálně nebo jednoduchými pomocnými měřidly [98][99].

Skrytá vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit až po obrobení odlitku, prorýsováním nebo pomocí vhodných přístrojů či laboratorními zkouškami.

Při výskytu určité vady odlitku pak sehrává svou významnou roli správné stanovení druhu vady, od kterého pak probíhá další činnost k určení původu vady, ke stanovení příčin a prostředků k zabránění jejího vzniku. Pro kvalifikaci vad byla vydána norma ČSN 42 1240, která je dělí do 7 základních skupin, zde uvedené třídění vad odlitků platí pro všechny druhy a typy slévárenských slitin, bez zřetele ke způsobu

výroby a technologii odlévání. Avšak díky novým poznatkům o příčinách a tvorbě vad odlitků, které byli publikovány od doby vzniku normy, je některými odborníky norma považována za zastaralou a nevyhovující. A jelikož je správné určení vady předpokladem snižování zmetkovitosti odlitků, byla jimi vytvořena nová kvalifikace vad zaměřená na odlitky ze slitin železa, viz tab. 7-3.

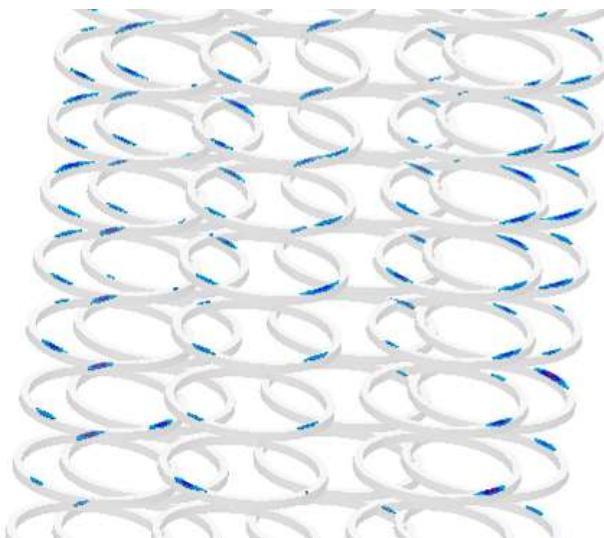
Každá vada je zde označena třímístným číselným kódem, kdy první číslo značí třídu slévárenských vad odlitku (100-700), následující číselný znak označuje skupinu slévárenské vady (každá třída má jiný počet skupin) a poslední číslo charakterizuje konkrétní druh vady, ne každá skupina se však dále dělí na konkrétní druhy vad [98][99].

Oproti normě, která nabízela pouze 37 možností vyhodnocení vad odlitku, tento návrh umožňuje až 108 možností vyhodnocení vad ve slitinách železa. Tento způsob je tedy mnohem přesnější a díky tomu je možné konkrétnější vyhodnocování vad a účinnější prevence vzniku vad v odlitcích.

Tato kapitola dále sleduje oblasti možného vzniku vad, zjištěné na základě simulačního výpočtu v porovnání s reálnými vadami zjištěnými ve stejných místech na reálných odlitcích. Jedná se zejména o vady typu bubliny. Největší problémy při odlévání pístních kroužků ve slévárně Buzuluk a.s., zjištěné na základě simulačních výpočtů, jsou tedy spojené se vznikem bublin v odlitcích pístních kroužků. Vznik bublin v tomto typu odlitku je především zapříčiněn zahlcením vzduchu vlivem špatné prodyšnosti formy. Dále pak jsou některé vady typu bublin zapříčiněny plyny uvolněnými z formovací směsi, tedy zvýšená tzv. plynatvornost slévárenské formovací směsi. Vady odlitků a jejich lokalizace na pístních kroužcích predikované simulačními výpočty řešenými v rámci této habilitační práce se shodují s vadami na reálných odlitcích.

Tabulka 7-3 Třídění slévárenských vad odlitků

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu
		120	Chybějící část odlitku s lomem
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar
		140	Nedodržení hmotnosti odlitku
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny
		220	Zálupy
		230	Nárosty
		240	Výronky
		250	Výpotky
		260	Zatekliny
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku
		280	Vady povrchové ochrany odlitku
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny
		320	Praskliny
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu
400	Dutiny	410	Bubliny
		420	Bodliny
		430	Odvařeniny
		440	Staženiny
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
		520	Nekovové vměstky
		530	Makrosegregace a vycezeniny
		540	Broky
		550	Kovové vměstky
		560	Nevyhovující lom
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny
		620	Vměstky
		630	Nesprávná velikost zrna
		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka
		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury
700	Vady chemického složení a vlastností odlitku	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku



Obr. 7-21 Výsledky porozity v detailu na jednotlivých pístních kroužcích



Obr. 7-22 Odlitky pístních kroužků s viditelnými vadami

Získané reálné odlitky s vadami jsou patrné z obrázků 7-22 a 7-23 . U odlitků se vyskytují vady malých dutin, zateklina, prasklina a případně drobné bodlinky.

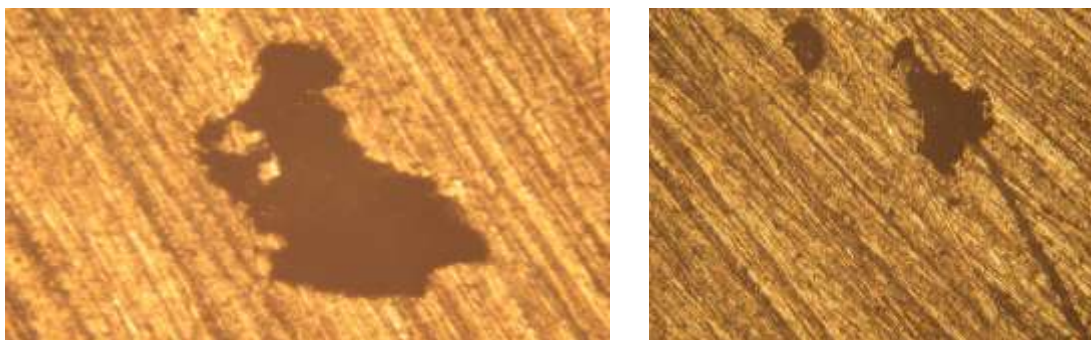
Metalografické hodnocení bylo zaměřeno na otázku zda-li je v odlitku výrazná tepelná osa s nahromaděním dutinek a drobných skrytých vad a druhou otázkou bylo stanovení příčiny vzniklých slévárenských vad (dutiny v povrchu) a nepatrné vady v tělesech pístních kroužků po obrobení.



Obr. 7-23 Hrubé (vlevo) a již opracované (vpravo) odlitky vybraných pístních kroužků s vadami

Metalografické hodnocení vad litinových vzorků bylo rozděleno do dvou etap pozorování: 1. *etapa* - sledování vad litinových odlitků přímo z plochy pístního kroužku při 50 násobném zvětšení. 2. *etapa* - sledování vad odlitků při 100 a více násobném zvětšení.

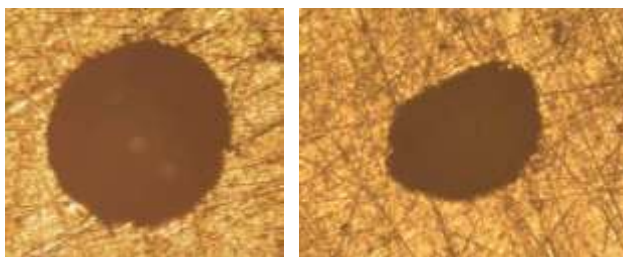
Details vad získané z první etapy jsou uvedeny na následujících obrázcích 7-24 až 7-26 .



Obr. 7-24 Sledované vady na obrobených plochách pístních kroužků (50x zvětšeno)



Obr. 7-25 Sledované vady na obrobených plochách pístních kroužků (50x zvětšeno)



Obr. 7-26 Sledované vady na obrobených plochách pístních kroužků (50x zvětšeno)

Z obr. 7-24 až 7-26 je zřejmý tvar vad. Tvar vad je půdorysný a poměrně členitý, v dutinkách jsou patrné cizí částice, vměstky nekovového charakteru. K jejich identifikaci následně přispělo vícenásobné zvětšení a použití skenovacího elektronového mikroskopu.

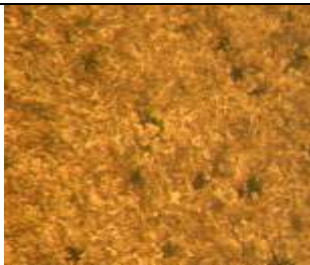
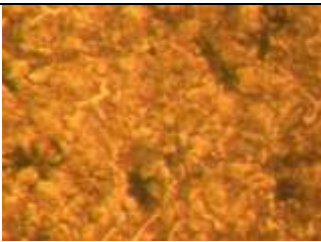
Metalografická sledování při větším zvětšení byla prováděna za účelem lepší identifikace vad odlitků pístních kroužků.

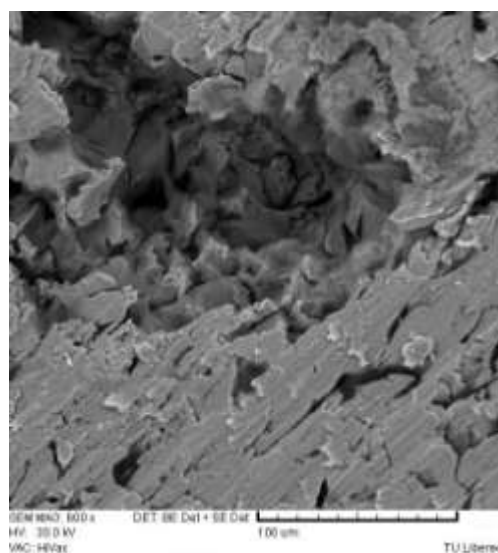
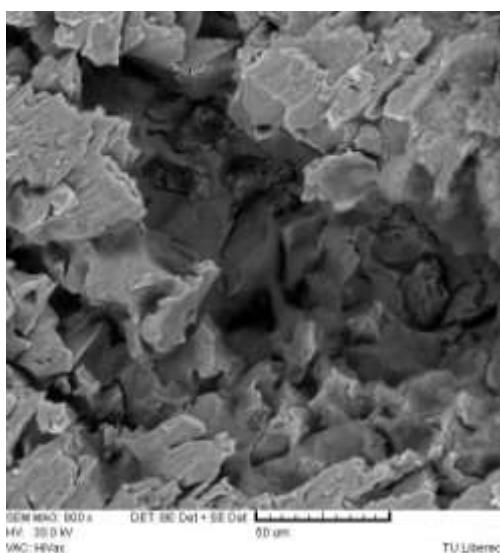
Vzorky pístních kroužků pro metalografická pozorování byly získány z mechanicky rozřezaných pístních kroužků tak, aby obsahovaly příslušné vady. Tyto vzorky byly připraveny pro mikroskopické pozorování běžným metalografickým způsobem (broušeny, leštěny a leptány Nitem). Dále byly podrobeny pozorování na světelném mikroskopu Neophot 21 (Carl Zeiss Jena). Pozorování vzorků bylo zaměřeno na sledování tepelné osy odlitku a dále na identifikaci slévarenských vad.

V následujících obrázcích viz tab. 7-3 jsou detaily vad pístních kroužků doplněné u některých vzorků obrázky tvaru, rozložení grafitu a struktury základní kovové hmoty.

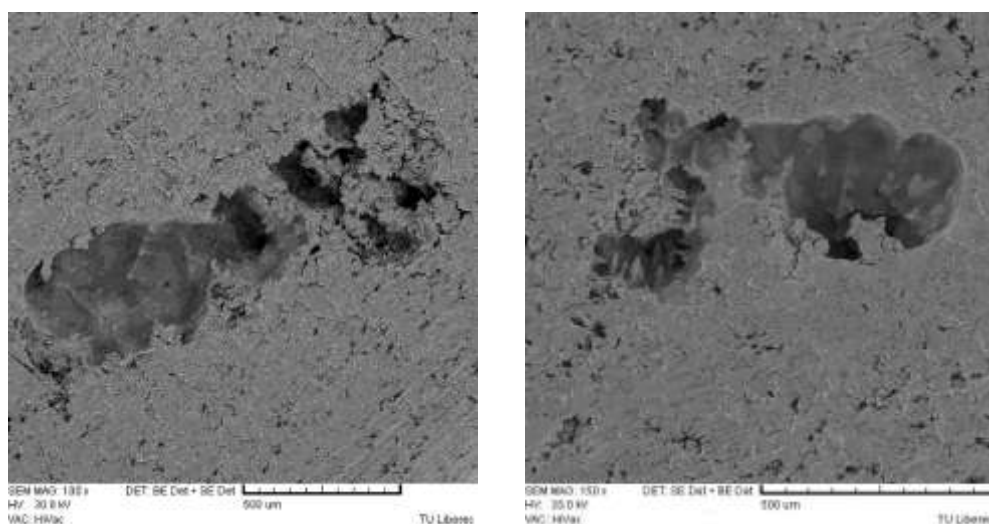
Z důvodu, že snímky vad (dutin) odlitků pořízené světelným mikroskopem jsou v některých hloubkách málo čitelné, bylo přistoupeno k použití sledování vad částečně opracovaného kroužku za použití skenovacího elektronového mikroskopu při zvětšení 100, 200 a 500 násobném. Získané snímky ukazují v některých oblastech vad částice formovací směsi, která je zalita ve vzniklé dutince pístního kroužku, případně detaily vnitřní struktury dutiny vady viz obr. 7-27 až 7-30. Na obr. 7-31 jsou zobrazeny sledované vady na obrobených plochách pístních kroužků. Vlevo je zobrazena predikce vady počítačovou simulací a vpravo reálný odlitek s vadou na stejném místě.

Tabulka 7-4 Charakter vad vad pístních kroužků při vyšších zvětšeních

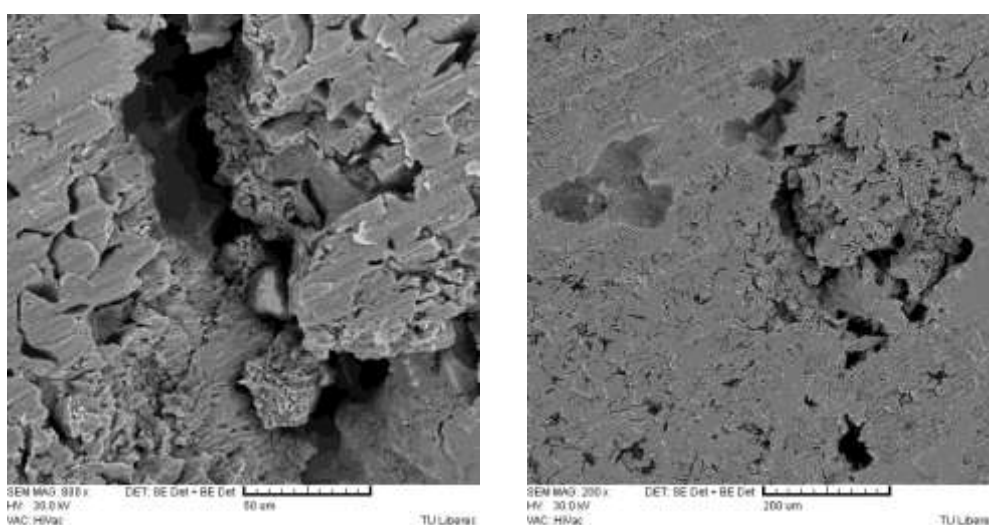
		
Velikost, tvar a rozložení grafitu, (zvětšeno 200x)	Struktura pístního kroužku - perlitická matrice s malým podílem feritu, (zvětšeno 200x)	Velikost, tvar a rozložení grafitu, (zvětšeno 500x)
		
Struktura pístního kroužku - perlitická matrice s nepatrným podílem feritu, Nital, (zvětšeno 200x)	Část místa vady s porušenými kulovitými útvary ostřiva. (zvětšeno 200x)	Část dutiny v odlitku pístního kroužku vyplněná zrnky ostřiva, (zvětšeno 200x)



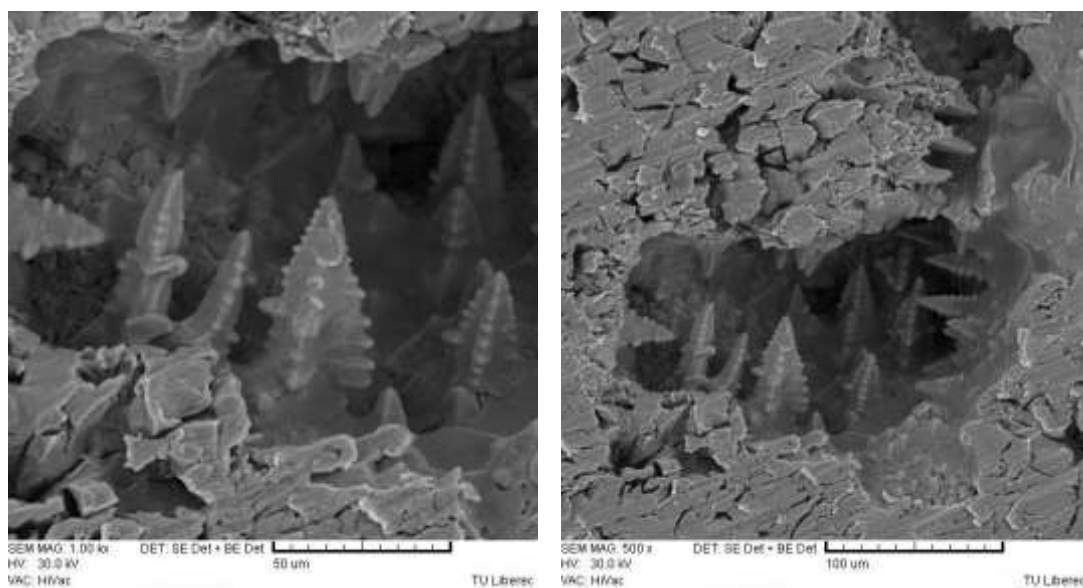
Obr. 7-27 Sledované vady pod elektronovým mikroskopem



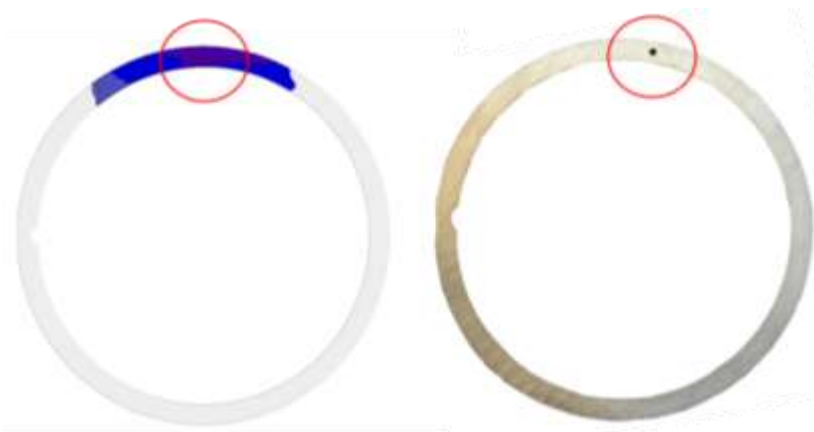
Obr. 7-28 Sledované vady pod elektronovým mikroskopem



Obr. 7-29 Sledované vady pod elektronovým mikroskopem



Obr. 7-30 Sledované vady pod elektronovým mikroskopem



Obr. 7-31 Sledované vady na obrobených plochách pístních (vlevo predikce vady počítačovou simulací, vpravo reálný odlitek s vadou na stejném místě)

Na základě výsledků metalografického pozorování lze konstatovat, že na žádném vzorku pístního kroužku nebyla patrná tepelná osa odlitku, která by mohla přispívat k necelistvosti středních partií odlitku nebo se podílet na vzniku dutin. Jak je patrné ze sledované struktury odlitků pístních kroužků, grafit je lupínkový, velmi jemný, s náznakem mezidendritického neusměrněného uspořádání. Matrice perlitická s malým množstvím feritu. Lze konstatovat, že prováděná metalurgie je v tomto smyslu prováděna velmi dobře.

Z některých obrázků metalografického pozorování obsahu dutin vad odlitků pístních kroužků je zřejmé, že v těchto dutinách se objevují kulové částice ostřiva formovací směsi. Nebo alespoň v povrchových partiích náznak částic formovací směsi, jejichž částice byly v důsledku přípravy metalografického vzorku ubroušeny. Velikost těchto částic se pohybuje cca od 0,065 až do 0,13 mm. Některé dutiny vad odlitků jsou kulového tvaru s náznakem částic formovací směsi, především ostřiva. Zde pravděpodobně došlo při vniknutí směsi do taveniny ještě k vyhoření příměsí a nečistot formovací směsi a plyny přispěly k vytvoření pravidelného tvaru dutin.

Nepatrné dutinky „tvaru špendlíkové hlavičky“, které se vyskytovaly na obrobených odlitcích stěracích kroužků, lze z důvodu jejich pravidelnosti spíše přisoudit plynům vzniklých z vlhkosti (např. navlhělého očkovačla nebo různého náčiní) a označit je jako bodliny. Tyto vady by mohly být odstraněny důslednější činností při přípravě taveniny. Je třeba jim věnovat pozornost po delší dobu výroby.

Sledované odlitky pístních kroužků obsahují vady - zadržování způsobené úlomky zhuštěné formovací směsi po odlití do taveniny. Pro odstranění těchto vad je

nutno věnovat pozornost především ověření správnosti a dodržení technologického postupu výroby slévárenských forem, popř. přípravě formovací směsi.

V této souvislosti je třeba se zaměřit na tvrdost spodních forem nebo provést korekci seřízení tlaků nebo zhušťujících účinků formovacího stroje. Jinak lze předpokládat, že je v pořádku konstrukce vtokové soustavy sloupce navýšených forem. V krajním případě, by možná stálo za úvahu, dávat do etáže při odlévání menší počet forem (tím lze snížit metalostatický tlak působící na spodní formy a také dynamický ráz účinku taveniny, který je dvojnásobkem metalostatického tlaku). I když dynamický tlak není tak značný, některé části zhuštěné formy mu plně neodolávají. Pro zlepšení kvality líce formy a také povrchů odlitků doporučuji každou formu ošetřit nástřikem.

Vedle ověření dodržování technologického procesu výroby forem je třeba se zaměřit na přípravu formovací směsi ve vířivém mísiči. S ohledem na hlavní úkoly, tj.:

- a) stanovit optimální složení směsi (včetně velikosti ostřiva);
- b) samostatným problémem je řízení potřebného obsahu vody, nejlépe udržováním optimální spěchovatelnosti směsi ve formě;
- c) udržet požadované složení a stupeň znečištění a tím také její konstantní a vyhovující vlastnosti při minimálním oživení směsi;
- d) kromě vlastního řízení kvality směsi je stejnoměrná a pokud možno vyhovující funkce zařízení úpravny směsi.

Poměrně velmi důležitá je souvislost mezi množstvím vody a teplotou vratné formovací směsi. Se vzrůstající teplotou směsi, která vstupuje do mísiče, se sice téměř nemění hodnota optimální spěchovatelnosti podle způsobu formování, ale dochází k odpařování vody a tuto vodu musíme navíc zpět dodávat.

V praxi mnoha sléváren se ověřilo, že je třeba udržovat konstantní teplotu formovací směsi (např. chlazením). Pokud teplota formovací směsi po namísení překračuje teplotu okolí o více než 30 °C, dochází k intenzivnímu obesýchání líce formy. Výsledkem je malá pevnost formy v její dutině a tím dochází k „pískovým“ vadám na odlitcích. Též může dojít i ke kondenzaci vlhkosti na chladnějších částech formy, která způsobuje odpaření odlitků.

Současně je také třeba věnovat pozornost dopracování (pokud to již neexistuje) a přesnému vymezení postupu přípravy taveniny s udáním výší teplot pro očkování

i odlévání a současně je také nutné přesně určit maximální čas setrvání očkovadla v pánvi s taveninou před litím. Tím by byl přesně vymezen postup přípravy a ošetření taveniny před litím v souvislosti snížení nebezpečí vzduchových (vodíkových, kyslíkových) bublinek.

Též by bylo dobré, na základě prováděné operativní kontroly odlitků, identifikovat vzniklé slévárenské vady i s ohledem na rozmístění kroužků v odlitém stromečku. Pokud se vyskytují vady „zadrogeniny“ způsobené vniknutím formovací směsi při lití do taveniny na kroužcích po celé výši stromečku, pak lze usuzovat, že není dobře zhuštěná forma nebo je nekvalitní formovací směs (nestejná vlhkost, nedobře rozmíchaná, atd.) nebo značné množství prachových podílů.

Pokud by sledované vady odlitků písních kroužků byly pouze ve spodních partiích stromečku, lze usuzovat, že k vymílání formy dochází v důsledku malého zhuštění formy a z důvodu značného účinku dynamického tlaku, ale to je asi málo pravděpodobné.

8. VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉHO SIMULACE JAKO NÁSTROJE K URČENÍ DEGRADACE BENTONITU

8.1 Poškození bentonitu v jednotných formovacích směsích

Jednotná bentonitová formovací směs kromě svých základních složek (viz kapitola 2.1.) dále obsahuje množství dalších látek (pojivo a přísady v různém stupni degradace, produkty tepelného a chemického rozkladu přísad, příměsí), které se vytvoří díky oběhům formovací směsi po slévárně a jejím poškozováním. Z toho důvodu je nutné směs hodnotit, kontrolovat a regenerovat resp. poškozený bentonit nahradit novým.

Bentonit ve formovací směsi je při výrobě odlitků poškozován hned několika způsoby – tepelné poškození, chemické poškození, pasivace a ostatní ztráty bentonitu.

Tepelné poškození je v podstatě dominantní degradace bentonitu a nastává při zalití formy a následným přestupem tepla z tekutého kovu. Množství takto poškozeného bentonitu je ovlivněno především licí teplotou kovu a také dobou ponechání odlitku ve formě. Tyto vlivy nelze nijak výrazně měnit.

Chemické poškození nastává v důsledku toho, že chemické látky a jejich ve vodě rozpustné soli obsažené v některých jádrových pojivech se váží na krystalickou mřížku bentonitu a tím znemožňují přístup vody do krystalů bentonitu. Tím se snižuje schopnost aktivace bentonitu. Totéž platí i pro chemicky znečištěnou vodu používanou při mísení. Míru znečištění lze zjistit elektrickou vodivostí výluhu směsi.

Pasivace je omezení přístupu vody. Některé látky vytváří na krystalech bentonitu nesmáčivý povrch a tím zamezí přístupu vody. Je to například hydraulický olej a dále produkty kondenzace uhlíkatých přísad a jádrových pojiv. Tento proces lze jen stěží ovlivnit a omezit.

Ostatní ztráty bentonitu nastávají například při odsávání použitelného (nepoškozeného) bentonitu v různých částech oběhu formovací směsi. Ztráty také nastávají při dopravování formovací směsi po pásových dopravnících a i to je důvod proč je směs nutné oživovat. Tyto ztráty však lze výrazně ovlivnit seřízením odsávání, případně vrácením „bohatých“ odprašků.

V ideálním případě je jednotná bentonitová formovací směs systémem skládajícím se z ostřiva, pojiva (bentonit), přísad a vody, viz kapitola 2.1. Ve skutečnosti však ještě

obsahuje nepřehledné množství dalších látek (pojivo a přísady v různém stupni degradace, produkty tepelného a chemického rozkladu přísad, příměsí), které se vytvoří díky oběhům formovací směsi po slévárně a jejím poškozování. Z toho důvodu je nutné směs hodnotit, kontrolovat a následně poškozený bentonit nahradit novým.

Bentonit ve formovací směsi je při výrobě odlitků poškozován hned několika způsoby – tepelné poškození, chemické poškození, pasivace a ostatní ztráty bentonitu [109][110].

8.2 Oživování jednotných bentonitových formovacích směsí

Jednotná formovací směs je vysoce stabilní systém, jehož složení, s výjimkou vlhkosti, nelze skokově změnit. Pod pojmem oživení se rozumí úprava použité formovací směsi tak, aby nabyla vlastností, které požadujeme pro odlévání. Oživením v podstatě nahrazujeme formovací směs, která zůstala na povrchu odlitků nebo se ztratila při čištění odlitků. Celý proces oživování formovací směsi v oběhu začíná u separace směsi z forem a z odlitků. Aby ekonomie pískového hospodářství byla co nejlepší, je důležité dávat důraz na co možná nejdůkladnější vytlučení směsi z odlitku. Takto oddělená směs se vyznačuje velkými změnami teplot, vlhkosti a obsahu prachových frakcí v závislosti na vzdálenosti formovací směsi od tuhnutí odlitku. Ke znehodnocení nebo ztrátě složek formovacích směsí během jednoho oběhu dochází jen v jednotkách procent z původního množství, což umožňuje pracovat jen s minimálním oživováním, obvykle 1-3% všech surovin. Oživování směsi je v podstatě dávkování nových surovin, abychom nahradili poškozený a ztracený bentonit v použité vratné směsi a také pro doplnění k novému ostřivu. V praxi se využívá tří hlavních možností jak stanovit potřebné oživování novými surovinami :

1. Zpětné řízení podle výsledků z laboratoře
2. On-line řízení pomocí měřicí a výpočetní techniky
3. Řízení pomocí bilance formovací směsi (někdy také nazývané preventivní řízení oživování)

Zpětné řízení oživování podle výsledků z laboratoře je nejrozšířenější ve většině českých a slovenských sléváren. Jedná se o zpětnou vazbu na výsledky měření, avšak nemůžeme se bezhlavě řídit jen podle jednotlivých výsledků, ale musíme neustále sledovat trend změn měřených vlastností a reagovat dříve, než vlastnosti vybočí z požadovaných hodnot. Podmínkou je grafické vyhodnocování hodnot. Hlavním

důvodem pro nutnost sledování trendu, a ne okamžitých hodnot, je rozptyl měřených hodnot. Například u pevností je tento rozptyl způsoben jednak nehomogenitou, ale i nedodržením optimální spěchovatelnosti, případně chybami při provádění zkoušek.

Dávkování ostřiva řídíme podle vyplavitelných látek. Když vyplavitelné látky stoupají, musíme přidat ostřivo. Změny v dávkování bentonitu řídíme podle hodnot vaznosti a dalších pevnostních vlastností. Jestliže tyto hodnoty klesají, zvyšujeme dávkování bentonitu a naopak. Dále dávkování můžeme kontrolovat podle obsahu aktivního jílu. Dávkování přísad řídíme například podle spalitelných látek, obsahu uhlíku nebo podle obsahu lesklého uhlíku.

U řízení oživování on-line pomocí automatického měření a přímého ovlivňování dávkování je předpokladem rychlé automatické vyhodnocení vlastností nejlépe ihned za mísičem, včetně základních měření (teplota, vlhkost) před mísičem. Řídicí systémy moderních připraven písku nejen automaticky vyhodnocují a kontrolují veškerou směs, která je vyrobena pro formování, ale také řídí její dávkování. Oproti řízení podle výsledků z laboratoře má tento systém k dispozici podstatně více údajů, protože automat dokáže měřit v kratších intervalech. Tím je částečně smazána hlavní nevýhoda řízení podle výsledků a to ta, že musíme čekat, až se něco změní a teprve potom můžeme dělat zásah.

Řízení oživování pomocí balance formovací směsi – podle skutečného znehodnocení je někdy také nazýváno jako preventivní řízení oživování, u nějž zásahy do dávkování nejsou prováděny odhadem, ale systematicky na základě výpočtu podle zatížení formovací směsi. V České republice však byly tyto výpočty užívány většinou jen při rozběhu výroby pro stanovení prvních přísad a dále byly směsi řízeny podle výsledků z laboratoře. V západních zemích se postupně prosadilo provádění balance směsi a její využívání ke stanovení potřebného oživování. Velký podíl na zavedení této metody má Ing. Hruška, podle kterého se také někdy tato metoda nazývá.

Vlastní řízení je zpracováno formou tabulek v programu Excel s minimálními nároky na obsluhu. Obecná pravidla této metody jsou uvedena v následujících bodech:

Množství nového ostřiva – nové ostřivo se do směsi dostává několika způsoby a to jako přírůstek do mísiče (oživování jednotné směsi), jako písek z rozpadlých jader, popřípadě z modelové směsi (pokud je používána). Na každou tunu odlitého kovu je nutno pro zachování množství vyplavitelných látek, pro udržení celkového znečištění směsi a stupně oolitace přidat 100 až 160 kg nového ostřiva podle tepelného zatížení

forem. Čím je vyšší stupeň degradace složek formovací směsi, tím je třeba přidat na jednu tunu tekutého kovu více nového ostřiva. Abychom mohli určit potřebnou dávku nového ostřiva do mísiče, musíme nejdříve zjistit, jaké množství nového písku se do směsi dostane z jader a z modelové desky.

Množství nového bentonitu – bentonit je nutné přidávat ze dvou důvodů. Prvním důvodem je doplnění k novému ostřivu. K novému ostřivu je třeba přidat tolik bentonitu, aby se dodržel požadovaný obsah aktivního bentonitu ve formovací směsi, který obvykle bývá 6 až 9 %. Druhým důvodem je náhrada znehodnoceného (tepelně degradovaného) a ztraceného bentonitu ve vratné směsi. Průměrná hodnota znehodnocení bentonitu se pohybuje od 2 do 5 %, přičemž rozhodujícím znehodnocením je právě termická destrukce v okolí odlitku a vtokové soustavy. Proto bylo jako kritérium zvoleno množství tekutého kovu. Na tunu odlitého tekutého kovu je tedy nutno doplnit 25 až 40 kg nového bentonitu. Celkové množství nového bentonitu je pak dáno součtem obou hodnot. Pokud používáme bentonit s nosičem lesklého uhlíku (směsný bentonit), pak musíme potřebné množství zvýšit o obsah uhlíkaté složky (viz množství směsného bentonitu).

Množství nového nosiče lesklého uhlíku – zde platí stejné zásady jako pro bentonit, proto potřebné množství stanovíme poměrem k novému bentonitu celkem. Obvykle to bývá 0,2 až 0,5 násobek bentonitu. Volba závisí na tepelném namáhání formy a na kvalitě používaného nosiče. Při používání směsného bentonitu, který mívá 15 až 30 %, je poměr dán výrobcem a měl by se přizpůsobit potřebám slévárny.

Množství směsného bentonitu – je dáno součtem bentonitové a uhlíkaté směsi.

Množství ostatních přísad – ostatní přísady, pokud jsou používány, se bez výjimky dávají v poměru k novému bentonitu. V praxi se jedná o tak malé dávky (1-6 % bentonitu), že obvyklé dávkovače neumožňují samostatné dávkování a tyto přísady jsou většinou dodávány jako součást směsných bentonitů.

Výše uvedená obecná pravidla pro oživování pomocí bilance je možné uplatnit při dávkování nových surovin dvěma základními způsoby:

Řízením dávkování podle bilance předchozího dne (směny), kdy jsou na začátku nového pracovního dne shromážděny údaje o předchozím dni (směně) mezi které patří hmotnost odlitého tekutého kovu, počet cyklů mísičů a množství písku z jader. Na základě těchto dat a výše uvedených pravidel se vypočte, jaké množství surovin pro

oživení se mělo do mísiče dávkovat v předchozím dni (směně). Toto dávkování se pak nastaví pro dnešní den (směnu). Je to sice se zpožděním jednoho dne, ale pořád je to mnohem dříve, než se změny stačí projevit na měřitelném složení formovací směsi. Výhodou tohoto řízení je, že systém zahrnuje i suroviny spotřebované na směs jdoucí do vadných forem a do přepadů, dále pak bilance eliminuje případné nepřesnosti v technologických podkladech.

Řízením dávkování podle modelů, kdy se pro každé modelové zařízení zjistí hmotnost tekutého kovu, potřebná hmotnost formovací směsi a odhadne se přísun písku z jader. Potom se provedou příslušné výpočty a stanoví se požadované ožívování pro jednotlivé odlitky. Výstupem je tedy seznam modelů s předepsaným dávkováním do mísiče. Při každé výměně modelu se tak provede změna dávkování. Nezbytné suroviny jsou tedy už ve směsi, ze které se formuje, a při zpracování vratu jsou ve směsi k dispozici. Výsledkem řízení je tedy konstantní složení vratné směsi, nikoli konstantní složení namísené směsi. Výhodou řízení podle modelů je to, že potřebné nové suroviny dáme hned při mísení pro daný model, a protože bentonit se aktivuje až dokonalým promísením, nejlépe pak nahřátím a napařením ve formě, je potřebné množství plně k dispozici ve vratu po odlití. Výhodou je také to, že systém nevyžaduje každodenní zásahy řídicího pracovníka. Nevýhodou je, že nemůže být zahrnuto jiné než průměrné množství směsi, která je připravena navíc (na vadné formy, na pouštění směsi zpět do zásobníku).

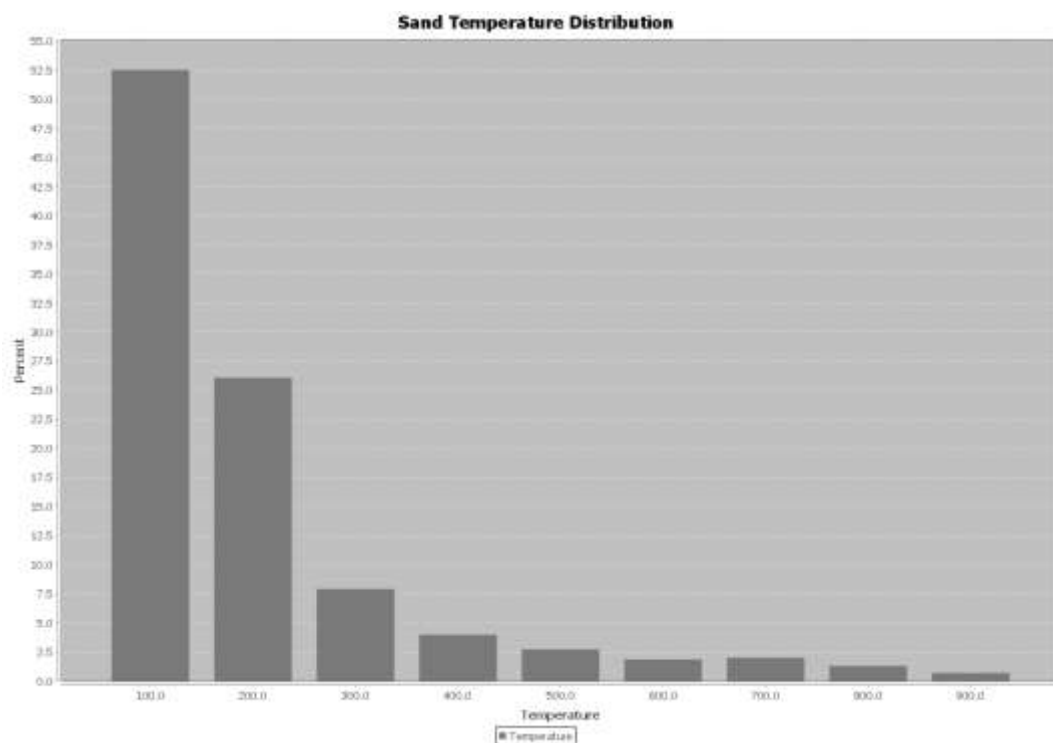
Nový možný způsob stanovení potřebného oživení formovací směsi bentonitem je *pomocí slévárenského simulačního softwaru*. Nejnovější verze simulačního softwaru Magma5 umožňuje mimo jiné, stanovit jaké množství komplexní formovací směsi bude tepelně zasaženo určitou teplotou vlivem přestupu tepla z odlévaného kovu do pískové formy a následně výpočtem stanovit i množství bentonitu poškozeného působením degradačních teplot. Potřebné množství bentonitu na oživení směsi pak můžeme snadno stanovit přepočtem procent zasažené směsi na hmotnost nového bentonitu do mísiče.

8.3 Vyhodnocení tepelné degradace bentonitu na základě výsledků simulačního výpočtu

Využití počítačové simulace je tedy další alternativou ke stanovení potřebného oživení formovací směsi bentonitem. Během simulačního výpočtu software ukládá velké množství dat, které uživatelé plně nevyužívají. Běžní uživatelé využívají

především grafické zpracování průběhů plnění formy a tuhnutí odlitku za pomoci barevných škál. Nejnovější verze simulačního softwaru Magma5 umožňuje mimo jiné, stanovit jaké množství komplexní formovací směsi bude tepelně zasaženo určitou teplotou vlivem přestupu tepla z odlévaného kovu do pískové formy a následně výpočtem stanovit i množství bentonitu poškozeného působením degradačních teplot. Potřebné množství bentonitu na oživení směsi pak můžeme snadno stanovit přepočtem procent zasažené směsi na hmotnost nového bentonitu do mísiče.

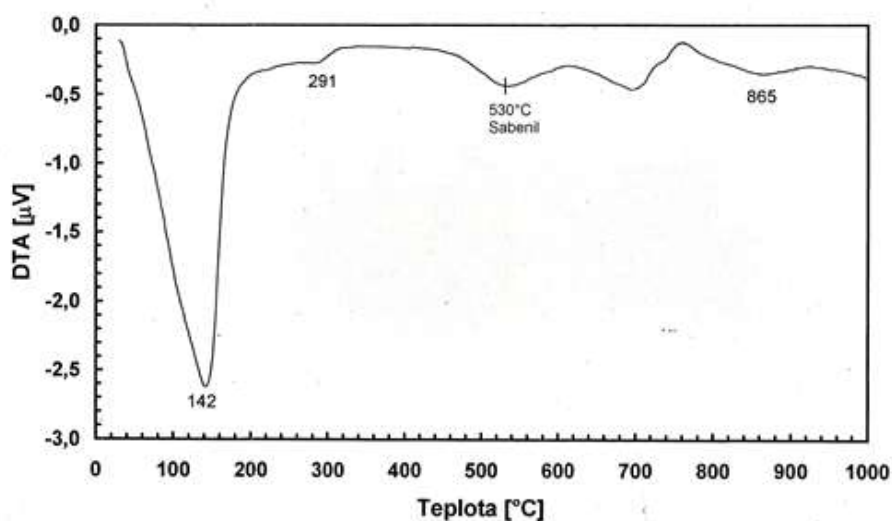
Tepelná degradace a její výpočet byl realizován v rámci simulace řešené v kapitole 7 této práce a degradace bentonitu byla hodnocena na dvou již zmíněných variantách simulačního výpočtu, které se liší rozdílnou teplotou lití. Vliv na tepelnou degradaci má nejen již zmíněná teplota lití, ale také složení a vlastnosti formovací směsi a druh odlévaného materiálu. Na základě těchto parametrů Magma5 stanovila, jaké množství komplexní formovací směsi bylo tepelně zasaženo určitou teplotou vlivem přestupu tepla z odlévaného kovu do pískové formy. Výstupem obou hodnocených variant byl obdobný graf, jako je graf na obr. 8-1.



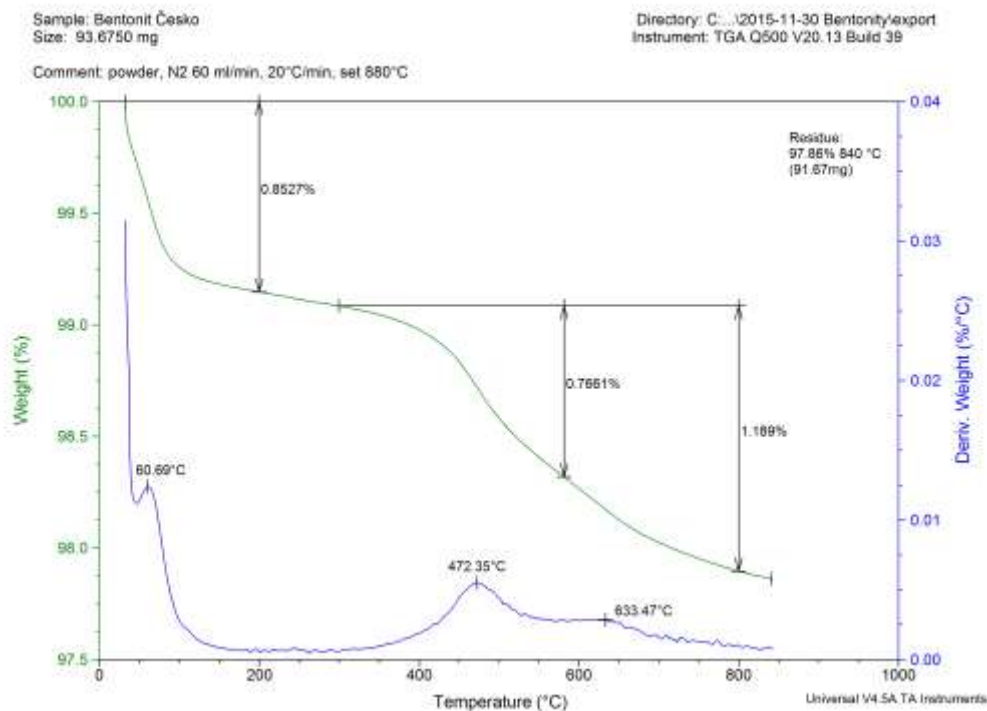
Obr. 8-1 Distribuce teplot v rámci celého tepelně zasaženého objemu písku formy

Kromě výsledků získaných ze softwaru Magma5, bylo pro výpočet tepelné degradace, ještě nutné zjistit, při jaké teplotě k degradaci dochází. Forma pro odlévání

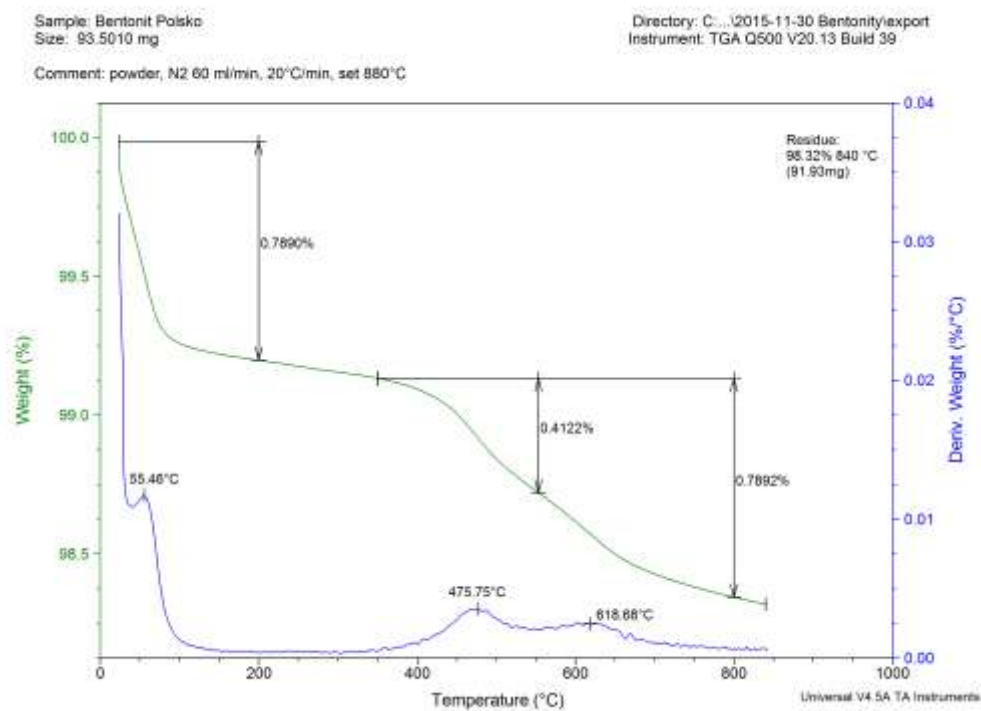
pístních kroužků je vytvořena z jednotné bentonitové formovací směsi. Do směsi je používáno bentonitové pojivo Sabenil + Sabenil K. Diferenční termickou analýzou Sabenilu, viz obr. 8-2, bylo zjištěno při které teplotě dojde u tohoto materiálu ke ztrátě chemicky vázané vody (OH skupiny). Analýzou byla zjištěna teplota 530°C a ta je tedy rozhodující pro degradaci bentonitu Sabenil. V rámci této práce byla provedena další termogravimetrická měření pro komplexní bentonitové směsi. Jedna bentonitová směs od českého (viz obr. 8-3) a druhá od polského producenta (viz obr. 8-4). Pro oba materiály jsou rozkladné teploty bentonitu lehce nad 470°C.



Obr. 8-2 Diferenční termická analýza Sabenilu

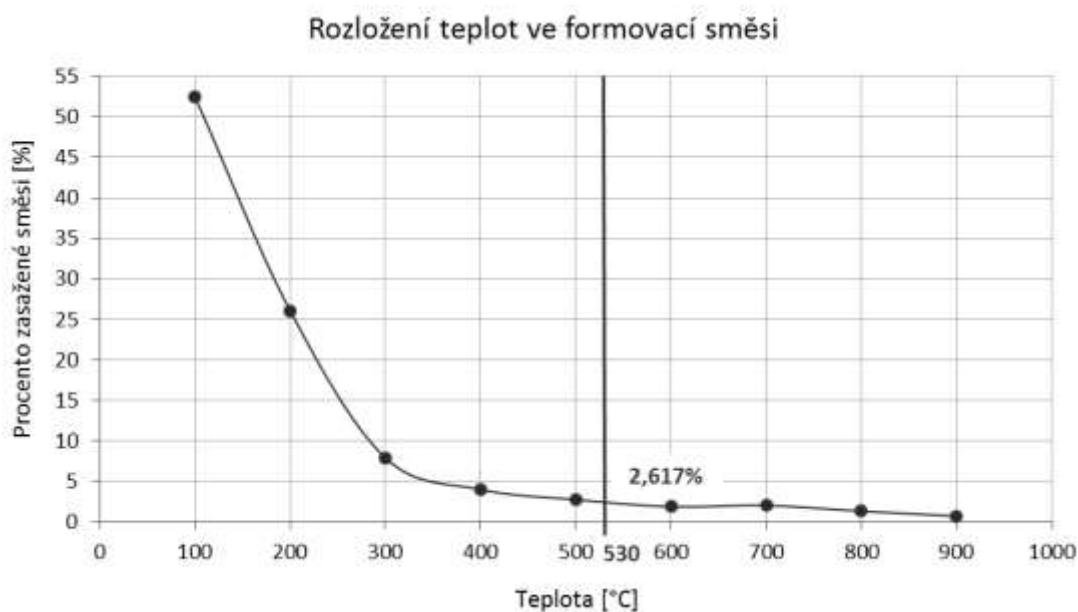


Obr. 8-3 Termogravimetrická analýza komplexní bentonitové směsi ČR



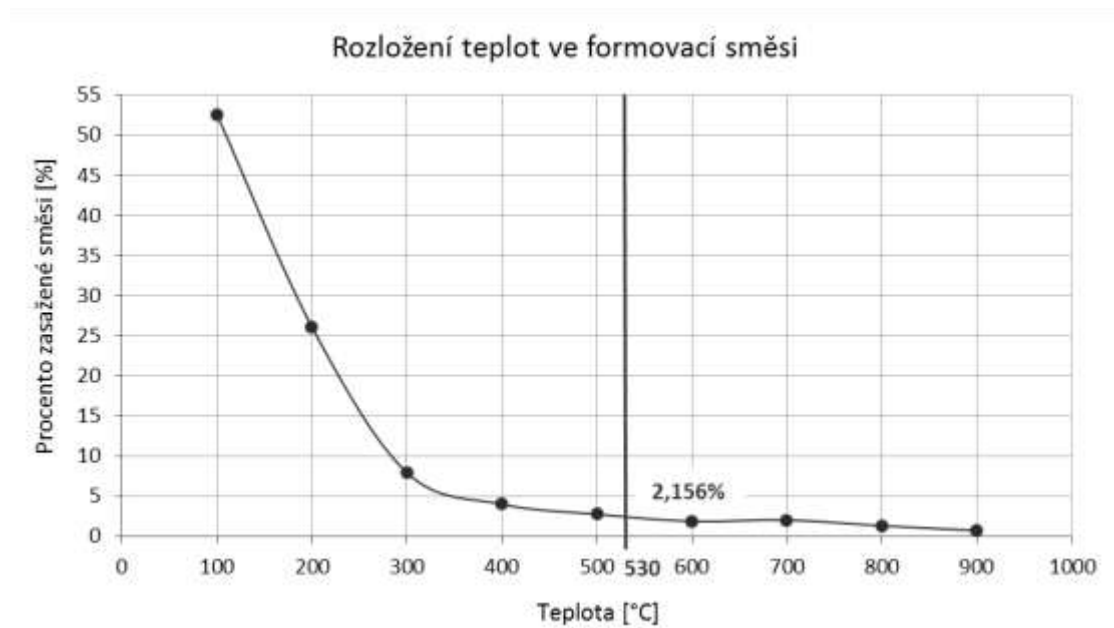
Obr. 8-4 Termogravimetrická analýza komplexní bentonitové směsi (Polsko)

Dle výsledků z programu Magma bylo možno sestavit následující grafy. Grafy vykazují, kolik procent formovací směsi v celém objemu formy bylo zasaženo konkrétní teplotou viz obr. 8-5 a 8-6..



Obr. 8-5 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma5 pro variantu 1

U varianty 1 (teplota lití 1470°C) bylo teplotou 530°C a vyšší zasaženo 2,617% jednotné bentonitové formovací směsi z celkového objemu formy. Z výsledků softwaru Magma5 bylo zjištěno, že celková hmotnost formovací směsi ve formě je 49,66 kg. Z těchto dvou hodnot byla jednoduchým přepočtem stanovena hmotnost tepelně degradované směsi, která činí 1,3 kg. Dále byla, jednoduchým přepočtem z celkového množství bentonitu ve směsi (8,89 %), stanovena hmotnost tepelně degradovaného bentonitu, která činí 0,116 kg. Tyto výpočty jsou detailněji rozebrány v příloze č. 15.



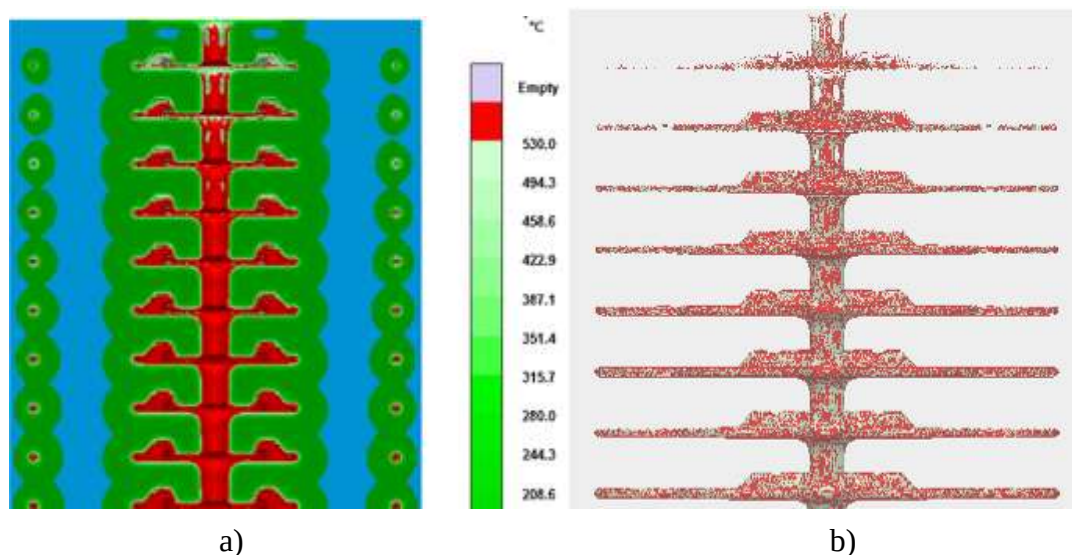
Obr. 8-6 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma5 pro variantu 2

U varianty 2 (teplota lití 1420°C), bylo teplotou 530°C a vyšší zasaženo 2,156%. Stejným způsobem jako v předešlém případě byla stanovena hmotnost tepelně degradované směsi, která činí 1,071 kg a hmotnost tepelně degradovaného bentonitu, která je 0,095 kg.

Tabulka 8-1 Výsledné hodnoty degradované směsi a bentonitu

	Množství tepelně degradované směsi ve formě v %	Hmotnost tepelně degradované směsi ve formě v kg	Hmotnost tepelně degradovaného bentonitu ve formě v kg
Varianta 1	2,617	1,300	0,116
Varianta 2	2,156	1,071	0,095

V tab. 8-1. jsou shrnuty výsledky simulačního výpočtu degradace směsi. Na obr. 8-7 jsou pak červeně znázorněna místa s teplotou 530°C a vyšší, což odpovídá místům s tepelně degradovanou směsí pro konkrétní typ bentonitu Sabenil dle diferenční termické analýzy na obr. 8-2.



a) znázornění teplot v řezu formy; b) znázornění degradované směsi

Obr. 8-7 Zobrazení degradace formovací směsi

Na základě získaných hodnot degradace bentonitu, bylo dále stanoveno množství bentonitu potřebného k oživení jednotné bentonitové formovací směsi v jedné dávce mísiče. Jedna dávka do mísiče, dle údajů ze slévárny, obsahuje cca 1300 kg směsi. Z toho je 1269 kg vratné směsi a 31 kg tvoří nové suroviny. Nové suroviny tvoří cca 25 kg ostřiva, 1,5 kg černouhelné moučky a 4,5 kg bentonitu.

Bentonit je nutné do směsi přidávat ze dvou důvodů. Prvním důvodem je nahrazení degradovaného bentonitu ve vratné směsi. Druhým důvodem je doplnění bentonitu na nové ostřivo. Na základě výpočtu softwaru Magma5, byly stanoveny hodnoty pro doplnění degradovaného bentonitu ve vratné směsi. Z hmotností vratné směsi v jedné dávce mísiče, podělené hmotností směsi potřebné pro vytvoření jedné formy, bylo zjištěno, kolik forem bylo z této směsi vyrobeno. Počet forem pak byl vynásoben hmotností tepelně degradovaného bentonitu v jedné formě (viz tab. 8-1). Tím jsme získali požadované množství bentonitu potřebného k oživení z důvodu tepelné degradace. Bentonit na vratnou směs by však měl ještě obsahovat jinak poškozený a ztracený bentonit, ten se však nedá nijak přesně určit a proto zde není uvažován. Celkové množství bentonitu pak bylo stanoveno sečtením množství bentonitu potřebného na doplnění k novému ostřivu a množství bentonitu potřebného na doplnění k vratné směsi. Výsledky jsou uvedeny v tab. 8-2. Všechny výpočty související s touto kapitolou jsou uvedeny v příloze č. 15.

Tabulka 8-2 Oživení směsi v mísiči dle slévárny a dle softwaru Magma5

		Dávkování dle slévárny	Dávkování dle výpočtu Magma5 (Varianta 1)	Dávkování dle výpočtu Magma5 (Varianta 2)
Dávka celkem v kg		1300	1300	1300
Vratná směs v kg		1269	1269	1269
Nové ostřívo v kg		25	25	25
Nová černouhelná moučka v kg		1,5	1,5	1,5
Nový bentonit v kg		4,5	5,19	4,65
z toho:	bentonit na nové ostřívo v kg	2,22	2,22	2,22
	bentonit na vratnou směs v kg	2,28	2,96	2,43

9. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Tato habilitační práce se zabývá komplexním pohledem na chování používaných slévárenských materiálů především pro výrobu pískových forem, ale i vlivem technologie na výslednou kvalitu vyráběných odlitků. Jsou zde shrnuty nejen aktuální poznatky o jakosti odlitků v průmyslové praxi, ale i vlivu technologie na výslednou kvalitu vyráběných odlitků. Habilitační práce byla koncipována nejen po stránce odborné, ale i po stránce didaktické. Byla snaha o vytvoření komplexního náhledu na pískové formovací směsi, jejich charakteristiky, zkoušení jejich vlastností až do vysokých teplot s využitím znalostí jejich tepelně - fyzikálních veličin. Tyto veličiny jsou nutné pro účely simulačních výpočtů a pro potřeby nastavení odpovídajících technologických parametrů slévárenské výroby. Formovací směsi a pískové formy vedou k celé řadě procesů, které výrazným způsobem ovlivňují kvalitu výrobků.

Tato habilitační práce by měla z didaktického hlediska ukázat vztahy mezi těmito složitými etapami slévárenské výroby a propojit jednotlivé kategorie slévárenských materiálů pískových bentonitových forem.

Velký rozvoj slévárenských pojiv především I. a II. generace spadá do období 40. let 20. století. Bentonitové směsi jsou jedny z nejstarších, nejpoužívanějších formovacích materiálů a z hlediska ekologie jsou velmi výhodné.

Díky rozsáhlým nalezištím bentonitových ložisek v ČR, která spravuje např. společnost Keramost a.s., byla tato pojiva ve slévárnách hodně rozšířena. Dalším vývojem byla zaměřena pozornost spíše na pojiva II. generace, která přinesla větší efektivitu výroby, ale současně i zhoršila ekologii výroby. To je do jisté míry důvodem faktu, že bentonitové směsi si stále udržují svoji technickou a také historickou úlohu v rámci sléváren v ČR. Celou plejádu vývoje těchto materiálů charakterizuje publikační činnost českých výzkumníků např. „ostravská škola prof. Ing. Petra Jelínka, CSc., Dr.h.c.“ a „brněnská škola prof. Ing. Karla Rusína, DrSc.“ V zahraničních publikacích jsou známi autoři LEBŠIN, GREFHORST, HOLTZER, LA FAY, KVAŠA a další.

Pokud se týká experimentálního sledování vlastností plynotvornosti můžeme konstatovat, že plynotvornost je jedna z velmi rozšířených avšak negativních vlastností formovacích a především jádrových směsí, která vzniká v důsledku tepelného namáhání slévárenských forem a jader po odlití taveniny do dutiny slévárenské formy tj. během

tepelného namáhání slévárenské formy. Pro měření plynotvornosti je však potřeba speciální měřicí zařízení, jehož pořízení je velmi nákladné. Proto byla snaha na pracovišti KSP TU v Liberci toto zařízení sestavit a následně dle vývoje moderní techniky inovovat. Pro měření plynotvornosti bylo na naší katedře sestaveno, ověřeno a ochráněno užitným vzorem měřicí zařízení pro sledování této vlastnosti až do teplot 1200°C. Současně je nutno konstatovat, že toto zařízení je využíváno nejen pro výuku v rámci bakalářských a diplomových prací, ale i pro výzkumné účely.

Tato habilitační práce shrnuje aktuální poznatky o charakteristikách a jakosti v praxi běžně používaných slévárenských materiálů, se zaměřením na pískové materiály s ohledem na vlivy které mohou ovlivnit jejich kvalitu. Dále má práce pomoci odpovědět na otázky jak může změna kvality slévárenských materiálů ovlivnit kvalitu výsledných výrobků. Tato práce zohledňuje mé pedagogické vlastnosti, které by měly přispět k didakticky kvalitní výuce studentů v rámci slévárenských předmětů a celkově přispět k rozvoji slévárenského oboru. V této habilitační práci jsou popsány souhrnné poznatky vlivu slévárenských materiálů na výslednou kvalitu odlitků, různé metody hodnocení vlastností slévárenských materiálů a popis vlivu tepelného zatížení na změny technologických a tepelně - fyzikálních vlastností těchto slévárenských materiálů. Další část této práce se věnuje oblasti využití simulačních výpočtů jako nástroje k predikci a eliminaci vad odlitků a dále jako nástroje použitelného k technologickému řízení slévárenské výroby, případně specifických součástí výroby.

V této habilitační práci jsou uvedeny dílčí informace o měření vlastností a výsledcích plynotvornosti, lineárních teplotních dilatacích měřených u různých druhů bentonitových, jádrových a formovacích směsí s cílem uceleného přehledu poznatků o jakosti vybraných slévárenských materiálů forem a jejich vlivu na kvalitu odlitků.

Pokud se týká plynotvornosti, je nutno konstatovat že v zahraničí jsou hodnoty plynotvornosti publikovány jen zřídka a ne vždy jsou k nim vztaženy všechny potřebné informace.

Naměřené hodnoty plynotvornosti a teplotních dilatací přinášejí provozní jistoty, potřebné pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování a uvědomělou volbu pojiv při výrobě jader i forem. Tím jsou plynotvornost a teplotní dilatace důležitými slévárenskými vlastnostmi směsí a výrazným způsobem ovlivňují výrobu kvalitních odlitků.

Celá problematika sledování těchto vlastností je velmi složitá. Složitost vyplývá z toho, že pískové formy a jádra představují porézní systémy, což jsou v podstatě kapilárně pórovitá tělesa, vyrobená z několika složek, které jsou více, či méně plynotvorné nebo vykazují větších, či menších rozměrových změn během zahřívání.

Ve slévárenské praxi formy a jádra obsahují velké množství dalších látek, které doprovázejí např. ostřívo. Tyto látky se při tepelném zatížení rozkládají, čímž přispívají k tvorbě uvolňovaných plynů. Vzniká dehydratace pojiva směsi, tepelná disociace vodní páry, tepelná disociace uvolněných plynů, suchá destilace a spalování organických látek, karbonizace uhlíkových přísad, spalování organických látek, tepelný rozklad minerálů atd.

Co se týká plynotvornosti samotných pojiv, plynotvornost jílových směsí není tak výrazná jako u pojiv na bázi organických látek (jako jsou např. pryskyřice). Pryskyřice jsou pojivové systémy jádrových směsí a sledování jejich plynotvornosti je pro slévárenskou praxi významné, neboť jsou velmi často značně tepelně namáhány tekutým kovem.

Pokud se týká metod sledování plynotvornosti, je možno konstatovat, že metody uvedené v této práci, jsou spíše komparační. Posuzují pouze, zdali daná formovací, resp. jádrová směs, uvolňuje více či méně plynů při stejných podmínkách.

Zatím nebyla vyvinuta taková metoda měření plynotvornosti, která by posuzovala plynotvornost komplexně, tj. s ohledem na tvar a velikost dutiny slévárenské formy a jádra, včetně materiálu použitého při odlévání daného odlitku. Do jisté míry se z části tomuto požadavku přibližují metody přímé (provozní), které využívají teplot roztaveného kovu.

I když metody nepřímé (laboratorní) pracují s malým vzorkem směsi, bez přítomnosti taveniny, dostávají většinou přednost před přímými metodami. To je způsobeno také díky tomu, že nároky na zařízení a přípravu vzorku jsou mnohem menší než u provozních měření. Pravděpodobně také proto, že výsledky měření plynotvornosti (přímou metodou) nepřinášely očekávané výsledky, a proto začaly být rozvíjeny nepřímé metody. Tepelné zatížení sledovaných vzorků je vyvoláno teplem odporové pece. Těmto metodám je věnována velká pozornost a postupně se začala konstruovat nejrůznější měřicí zařízení tohoto principu.

Plynotvornosti a konstrukci těchto zařízení se věnuje již řadu let pozornost i na našem pracovišti KSP TU v Liberci, kde bylo v poslední době zrekonstruováno

a zdigitalizováno měřicí zařízení plynotvornosti, které zobrazuje nejen maximální hodnotu objemu uvolněného plynu, ale celý časový průběh plynotvornosti.

Prováděná kalibrace měřicího zařízení dvěma způsoby (zátěžovou pumpou AMETEK a tepelným rozkladem CaCO_3) a jejich téměř shodné výsledky potvrzují plně dostačující přesnost měřicího zařízení a tím i odpovídající výsledky měření. Díky téměř shodným výsledkům kalibračních konstant z obou těchto metod je zajištěná velká přesnost měření.

Při měření plynotvornosti je nutno dodržet navrženou a odzkoušenou metodiku měření.

K problematice mechanismu uvolňování plynů je možné všeobecně konstatovat, že nejvyšší rychlost vývinu uvolněných plynů nastává hned na počátku měření a tedy i na začátku odlévání. Proto je v tomto případě velice důležité, aby tlak uvolněných plynů byl menší, než tlak působící taveniny.

Sledování plynotvornosti je poměrně složitá záležitost, jelikož např. pískové formy mají velmi pórovitou strukturu a skládají se z několika složek, přičemž každá z nich má větší či menší schopnost uvolňovat plyny.

Tyto složky zapříčiňují, že při zvyšování teploty nastává vypařování volné vody a jiných kapalných látek, tepelné roztažnosti vzduchu v dutině formy, spalování organických látek a uhlíkových přísad, tepelný rozklad minerálů a uhličitánů.

Hlavní složkou, která má velký vliv na plynotvornost jsou pojiva. Největší plynotvornost vykazují organická pojiva (pryskyřice) a nejmenší plynotvornost mají pojiva na bázi vodního skla. Nevýhodou pojiv na bázi vodního skla především vytvrzovaných CO_2 je příliš velká zbytková pevnost.

V této práci jsou v první řadě uvedeny komplexní hodnoty plynotvornosti pro bentonitovou formovací směs obsahující směsný bentonit typu KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K. Dále zde jsou uvedeny výsledky plynotvornosti pro pojivový systém ColdBox obsahující pryskyřičnou komponentu ASCOCURE 388 (0,55%) a aktivátorem ASCOCURE 688 (0,72%).

Shrnutí plynotvornosti pro jádro tvořené metodou ColdBox jsou pro čas 120 s následující: 800°C - $4,3 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; 1000°C - $5,8 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; 1200°C - $13,6 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$.

U bentonitové směsi byly za dobu 120 s získány tyto hodnoty plynotvornosti: 800°C - $2,9 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; 1000°C - $9,7 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; 1200°C - $19,9 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$.

V konečných časových hodnotách 120 s má jádro vytvořené metodou ColdBox při 800°C o 48% větší objem vyvinutých plynů než bentonitová směs. Při teplotě 1000°C vykazuje oproti bentonitu o 60% menší objem vyvinutých plynů, při 1200°C je to dokonce 68,6%.

Z grafických závislostí plynotvornosti na čase získaných měření plynotvornosti je patrné, že největší vývin plynů je na počátku měření, poté vývin plynů narůstá jen pozvolna a ke konci limituje k maximální hodnotě plynotvornosti. Vzájemným porovnáním jednotlivých směsí je možné říci, která ze zkoušených směsí má největší a která nejmenší plynotvornost. Avšak určitým nedostatkem je, že není možno uvést přesné chemické složení a původ pojiva nebo směsi. Přesto získané výsledky plynotvornosti lze pokládat i tak za významné.

Výsledky plynotvornosti stanovené jak na základě měření plynotvornosti komplexních směsí, tak jednotlivých velikostních frakcí, potvrzují nižší hodnoty u směsí s vodním sklem, které je anorganického původu. Směsi s vodním sklem by byly z tohoto pohledu pro výrobu jader příznivější, avšak k jejich menší použitelnosti přispívá velká zbytková pevnost po odlití. Vodní sklo, používané v této práci je označováno obchodním názvem Dorsil V.

Při posuzování plynotvornosti komplexních obalovaných jádrových směsí v porovnání s jejich oddělenými velikostními frakcemi u směsí č. 1 až č. 6 byl potvrzen předpoklad, že menší frakce, které ve stejném objemu mají větší celkový povrch, vykazují větší plynotvornost. To lze studentům vysvětlit tím, že ostřívo je díky většímu povrchu obaleno větším množstvím pojiva, které se hlavním dílem podílí na plynotvornosti směsi.

Detailní výsledky měření plynotvornosti pro jednotlivé materiály a použité teploty jsou uvedeny v kapitole č. 5.1, případně v příloze č. 9 této práce.

Pokud se týká dilatací, lze konstatovat, že pro jejich měření je nutné speciální zařízení - konkrétně speciálně konstruovaný dilatometr. Tato zařízení nebývají vyráběna sériově pro velkou finanční náročnost a současně každé zařízení specifikuje konkrétní zkušební vzorek.

Navržené zařízení na měření dilatace na KSP TU v Liberci se vyznačuje jednoduchou, ale velmi účelnou konstrukcí. Lze očekávat, že měřicí zařízení bude využito pro měření dilatace více druhů jádrových, popř. formovacích směsí a může být

zavedeno do výuky a využito při řešení bakalářských a diplomových prací. Dále může být využito pro vědecké účely.

Pokud se týká experimentů s postupným ohřevem vzorků, je možno konstatovat, že tyto experimenty jsou velmi časově náročné z důvodu ochlazení pece na pokojovou teplotu. Tato teplota je výchozí pro zahájení experimentů s postupným ohřevem. Nově rekonstruované zařízení se sběrníci dat pro zápis do PC lze považovat, ve srovnání s dřívější konstrukcí měřicího zařízení s mechanickým zapisovačem, za velmi pozitivní změnu z hlediska větší přesnosti grafického zpracování výsledků měření dilatace. Současné doplnění zařízení o začlenění regulátoru teploty pece rozšiřuje možnosti nastavení pro širší rozsah použití podmínek ohřevu vzorků (od nastavení měření ohřevu vzorku tepelným šokem, postupným ohřevem, popř. kombinací obou těchto variant). U měření, kde je uplatňován postupný ohřev vzorku, až do nastavené maximální teploty v peci, je možné nastavit i hodnotu přírůstku teploty za určitý časový interval, nejčastěji za minutu.

Výsledky získané měřením dilatací formovacích a jádrových směsí při jejich tepelném namáhání (ohřevu), přinesly dílčí informace o dilatačních vlastnostech vzorků měřených směsích.

Z pohledu použitých surovin pro výrobu slévarenských směsí je dilatace především závislá na charakteru a zrnitosti použitého ostřiva. Menší hodnotu dilatace lze očekávat u směsí s větším rozptylem velikosti středního zrna ostřiva (d_{50}). Též lze předpokládat menší hodnoty dilatace u směsí s ostrohrannějším ostřivem. Naopak směsi s kulatým tvarem ostřiva by měly vykazovat větší hodnotu dilatace. Kulaté ostřivo je právě typické pro jádrové směsi, kde se využívá poznatku, že koule je geometrický útvar, který má při maximálním objemu minimální povrch. To je příznivé pro spotřebu menšího množství pojiva, kterým bývají plynotvornější pryskyřice (např. oproti vodnímu sklu). V této souvislosti je také třeba upozornit, že ostřivo křemenného charakteru vykazuje během ohřevu modifikační přeměny, které jsou spojeny i s rozměrovými změnami.

Podle dosažených výsledků hodnot dilatací je zřejmé, že na časový průběh dilatace má velký vliv i charakter ohřevu. Postupný ohřev vzorku způsobuje pozvolný náběh dilatace s probíhajícím časem, naopak ohřev vzorku tepelným šokem vykazuje strmější náběh dilatace. V tomto případě není vzorek prohřátý rovnoměrně a více dilatují povrchové části vzorku, které jsou prohřáté na vyšší teplotu, než jeho vnitřní

partie. Jakmile dojde k prohřátí vzorku v celém objemu, hodnota dilatace má podobný průběh jako dilatace vzorku při postupném ohřevu. Vzhledem k tomu, že reálné odlévání se podobá svým charakterem spíše měření při šokovém ohřevu vzorku, protože je nutné taveninu odlévaného kovu nalít do dutiny formy co nejrychleji, bez dlouhých časových prodlev, většina experimentů v této práci je proto měřena právě při šokovém ohřevu vzorku. Naměřené výsledky dilatací jsou detailně uvedeny v kapitole č. 5.2.

Z průběhů dilatací je zřejmé, že největší smrštění vykazuje skupina vzorků č. I (směs ostřiva ST 52 PAP a 3 % pojiva Novanol) a to mezi teplotami 50 °C až 500 °C, naopak nejmenší smrštění vykazují skupiny vzorků č. V (směs ostřiva ST 56 PAP a pojivo 3 % Novanol) ve stejném teplotním rozmezí. Dále je patrná změna průběhu grafické závislosti, začíná postupný nárůst dilatace a to lze vysvětlit důsledkem změny β křemene v α křemen. Tato přeměna by měla probíhat při teplotě 573 °C, což přibližně odpovídá naměřeným průběhům. Největší dilatace byla dosažena u skupiny vzorků III (směs ostřiva ST 54 PAP a 3 % pojiva Novanol) a to v rozmezí teplot 700 °C až 750 °C. Naopak nejmenší dilatace byla naměřena u skupiny vzorků č. V (směs ostřivo ST 56 PAP a pojivo 3 % Novanol) ve stejném rozmezí teplot.

Největší smrštění je u skupiny vzorků I (směs ostřivo ST 52 PAP a pojivo 3 % Novanol), naopak nejmenší smrštění vykazovala skupina vzorků č. III (směs ostřivo ST 54 PAP a povivo 3 % Novanol). Smrštění probíhalo v intervalu teplot 50 °C až 600 °C. U skupiny vzorků č. IV a č. V nebylo žádné smrštění patrné. Z naměřených průběhů (viz obr. 6-8) je zřejmé, že přeměna β křemene v α křemen je posunuta do oblasti vyšších teplot a to asi o 50 °C. Největší dilatace byla naměřena u skupiny vzorků č. V (směs ostřivo ST 56 PAP a pojivo 3 % Novanol), a nejmenší dilataci vykazovala skupina vzorků č. I (směs ostřivo ST 52 PAP a pojivo 3 % Novanol). Z průběhů je dále patrné neshodné ukončení dilatace. Dilatace každého vzorku se zastavila na různé velikosti konstantního průběhu, lze předpokládat, že to mohlo být způsobeno v důsledku zborcení vzorku.

U postupného ohřevu nedocházelo k žádnému smrštění. To mohlo být příčinou rovnoměrného ohřevu vzorku. Je zde patrná změna křemene β v křemen α . Křivky všech skupin vzorků (č. I až č. V) mají velmi podobný průběh časové závislosti dilatace. Ustálení dilatace na konstantní teplotu je u každé směsi rozdílné. Toto by mohlo být důsledkem zborcení vzorku.

Z uvedených výsledků uvedených v této práci je zřejmé, že k vyšší hodnotě dilatace jednoznačně přispívá křemenné ostřívo. To také potvrzují naměřené hodnoty u směsí č. I až č.V, obsahující různé typy křemenného ostříva Střeleč. Maximální hodnoty dilatace jsou téměř shodné při teplotách 800 °C a 1000 °C a pohybují se v oblasti cca 0,7 % původní délky měřeného vzorku. Maximální hodnota dilatace u směsí č. VI až č. XI je opět na obou teplotách pro každý vzorek téměř shodná. Průměrně se hodnoty dilatace u směsí č. VI až č. XI pohybují kolem 0,1 % původní délky měřeného vzorku a méně.

Pokud se týká součinitele teplotní roztažnosti je nutno konstatovat, že vypočítané hodnoty jsou pouze informativní, neboť byly využity grafické závislosti dilatací na teplotě. Při porovnání vypočítaných hodnot teplotní roztažnosti slévarenských směsí č. I až č.V (obsahující různé typy křemenného ostříva Střeleč) s tabulkovými, pokud byly vůbec nalezeny, lze konstatovat, že vypočítané hodnoty se nejvíce blíží k hodnotám kolem teplot 100 °C.

Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti při vyšších teplotách fyzikální tabulky téměř neuvádí, to se týká také hodnot teplotní roztažnosti křemene při vyšších teplotách a i proto jsou výsledky této práce přínosem. Tabulkovým hodnotám se více blíží vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti zjištěné na základě ohřevu tepelným šokem, než postupným ohřevem. Vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti (směsí č. I až č. V) dosahovaly hodnot od $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (pro rozsah teplot do 100 °C) do $133,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (pro rozsah teplot do 1000 °C). Tak např. tabulkové hodnoty čistého křemene pro teplotu do 100 °C činí $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. U vzorků č. I a č. II. byla pro teplotu do 100 °C vypočítána shodná hodnota součinitele teplotní roztažnosti $7,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Pokud se týká hodnocení souvislosti mezi plynotvorností a dilatací vybraných směsí, je možno konstatovat, že momentu začátku vývinu plynů (počátku plynotvornosti) odpovídá i počátek rozměrových změn směsi. Další závislosti již souvisí s typem měřeného vzorku a s podmínkami experimentu.

Pokud bych se vyjádřil k výsledkům provedených výpočtů uvolněných plynů z nejvíce uplatňovaných reakcí při tepelném zatížení forem, resp. formovacích a jadrových směsí, je možno konstatovat, že u rovnic, které obsahují kyslík s uhlíkem za vzniku jeho oxidů, vzniká spálením 1 g uhlíku $1,8 \text{ dm}^3$ plynu.

Pokud probíhá reakce mezi uhlíkem a jeho oxidem, množství vzniklého plynu, ze stejného množství uhlíku, je dvojnásobné. Stejně množství uvolněných plynů vzniká reakcí uhlíku s vodní párou. Až trojnásobné množství uvolněných plynů vzniká reakcí uhlíku a vodní páry za vzniku oxidu uhličitého. Též nezanedbatelné množství plynu vzniká rozkladem metanu, z 1 dm³ metanu vznikne dvojnásobné množství vodíku. Též větší množství plynů vzniká při reakcích s uhlíkem. Uhlík je také stavebním prvkem organických látek a tím i stavební jednotkou pryskyřičných pojiv.

Pokud sledujeme procentuální podíly z celkového obsahu uvolněných plynů, též je možno konstatovat, že největší podíl uvolněných plynů vzniká destilací organických látek, která činí u skořepinových forem až 90 %.

Pokud se týká mechanismu uvolňování plynů, je možno konstatovat, a to také potvrdily provedené experimenty, že největší rychlost vývinu uvolněných plynů nastává v počátku měření a v počátku odlévání. V tomto případě je důležité, aby tlak plynů uvolněných z formy nebo jádra byl menší, než tlak působící taveniny.

Jak je obecně známo, Gibbsova energie je termodynamický potenciál, který je mírou průběhu dějů při konstantní teplotě a konstantním tlaku. Z těchto výpočtů lze také stanovit rozkladné teploty nebo teploty přeměn pro průběh reakcí, kdy význam má změna Gibbsovy energie. Tyto výpočty byly uplatněny u reakcí vývinu plynů, které vznikají v důsledku tepelného zatížení forem, resp. formovacích a jádrových směsí. Pokud se týká rozkladných teplot těchto reakcí, které jsou uvedeny v tabulce přílohy č. 13, lze tyto hodnoty dát do souvislosti s výší teploty formy při odlévání, resp. s tuhnutím odlitku z oceli na odlitky nebo z litiny. Lze předpokládat, že tato teplota činí 97% teploty tání odlévaného kovu (slitiny) a pak proběhnou rovnice č. 3 až č. 9, přílohy č. 13. Spalování organických látek obsažených ve formovacích a jádrových směsích může probíhat za přítomnosti oxidovadel, kterým je nejčastěji kyslík ze vzduchu (jež je uzavřen v pórech směsi), dále vodní pára nebo oxid uhličitý. Významné jsou reakce oxidace tuhého uhlíku za vzniku CO₂ nebo CO. Dokonalé spalování uhlíku za vzniku CO₂ je možné jedině při zajištění dostatečného přístupu vzduchu do oblasti možné reakce. Závislost Gibbsovy energie na teplotě reakce $C(s) + O_2(g) = CO_2(g)$ vykazuje přímku, která je rovnoběžná s osou x, a na ose y vytíná hodnotu - 393 777 J, z pohledu fyzikální chemie jde o reakci exotermickou.

Jako odlitek, který je vyráběn v pískových bentonitových formách, byl vybrán písní kroužek. Na jeho výrobě je možné demonstrovat studentům další výrobní souvislosti. Písní kroužek je odlitek, který má splňovat řadu vlastností užitných i mechanických. Proto jsem se v této práci zaměřil na tento tenkostěnný odlitek relativně malých rozměrů. Písní kroužek by měl splňovat celou řadu kritérií a to včetně výsledné kvality tohoto odlitku. Lopatka turbíny, hlava motoru, písní kroužky a další, to jsou odlitky při jejichž potenciální závadě v reálném životě nastává velké riziko ohrožení lidského života. Kvalita písního kroužku musí být odpovídající jeho funkci. Je nutno dbát na preciznost celé výroby již během přípravy taveniny a dále v rámci metalurgického zpracování. Proto také byla v rámci této habilitační práce řešena simulace výroby tohoto konstrukčního dílu.

K simulačnímu výpočtu je potřeba mít k dispozici speciální simulační softwary, které jsou dnes již produkovány profesionálně. Tyto softwary popisují fyzikální podstatu sdílení tepla jak v odlitku, tak ve slévárenské formě. Současně je nutno provést matematický popis probíhajících dějů. Tím se právě liší kvalita jednotlivých simulačních programů. Současně je nutno pro potřeby simulačních výpočtů použít odpovídající tepelně – fyzikální veličiny pro všechny použité materiály. Potom je předpoklad že provedená simulace se bude co nejvíce blížit skutečnosti.

Výsledky obsažené v této práci obsahují dílčí informace o predikci vad písních kroužků. Tato predikce byla provedena s využitím numerického simulačního výpočtu pomocí programu Magma5. Dále pak práce obsahuje informace o porovnání vad zjištěných na základě simulačních výpočtů s vadami reálných odlitků. Odhalením příčin vzniku těchto vad, právě za pomoci simulačních výpočtů, je možné následně zlepšit kvalitu výroby písních kroužků ale samozřejmě i jiných typů odlitků.

Výsledky simulačních výpočtů ukázaly, že mezi zvolenými variantami nejsou výrazné rozdíly, co se týká výskytu vad. V obou případech se jako největší problém ukázal vznik bublin. Na to poukazují výsledky simulačního výpočtu zejména u kritéria znázorňujícího množství zahlceného vzduchu ve formě. Ve výsledcích simulačních výpočtů se bere jako potenciálně problémový zahlcený vzduch ten, jehož koncentrace je vyšší než 15%. Hraniční hodnota koncentrace zahlceného vzduchu v odlitku, za kterou by se pak zahlcený vzduch neměl dostat je 25%. Zde jsou však oblasti, kde zahlcený vzduch stoupá až k hodnotám 35% - 40%. V těchto místech odlitku s překročenou doporučenou koncentrací zahlceného vzduchu tedy můžeme očekávat vznik bublin.

Příčinou těchto problémů bývá špatná prodyšnost formy. K jejich odstranění by tedy bylo vhodné zlepšit prodyšnost formy, případně do míst s největšími problémy přidat drobné výfuky. Riziko vzniku bublin potvrzuje i kritérium přetlaku vzduchu. Toto kritérium je také součástí simulačního výpočtového programu Magma5. V místech nárazu dvou proudů taveniny v dutině formy dochází ke zvýšení tlaku a tyto místa jsou tedy náchylnější ke vzniku bublin. Místa vzniku bublin predikovaná těmito kritérii simulačního výpočtu jsou shodná s vadami na reálných odlitcích viz kapitola 7.5.

Další možnou příčinou vzniku bublin v pístních kroužcích jsou uvolněné plyny z pískové formovací směsi. Důvodem může být vyšší plynotvornost směsi, to však nebylo možné v našich podmínkách ověřit. Katedra strojírenské technologie při TU v Liberci totiž nevlastní zařízení, které by umožnilo měřit danou směs při tak vysoké teplotě. Maximální teplota, při které je na našem pracovišti v tuto chvíli možné měřit plynotvornost těchto materiálů je maximálně do 1200°C.

Co se týká hodnocení výsledků predikce porozity v rámci provedeného simulačního výpočtu, byla její maximální hodnota zjištěna ve čtvrtém patře odlitků u varianty 1 při lici teplotě 1470°C a její hodnota činí 3%. Při celkovém zhodnocení je pak výskyt porozity o něco vyšší u varianty 2 při lici teplotě 1420°C, i tak je ale pravděpodobnost jejího vzniku minimální. U reálných odlitků též nebyli zjištěny žádné problémy se vznikem porozity. Avšak vzhledem k místům výskytu porozity, které odpovídají místům vad na reálných odlitcích, je možné, že některé bubliny jsou součtovou vadou, vzniklou jak zahlceným vzduchem, tak právě porozitou.

Penetrace taveniny do formy a připečeniny, na které má výrazný vliv teplota lití, se vyskytují pouze v oblasti liciho kůlu, případně v oblasti zářezů, což tedy nijak neovlivňuje kvalitu budoucích odlitků pístních kroužků.

Výsledky této habilitační práce dále obsahují informace o degradaci bentonitu ve formovací směsi. Pro získání všech potřebných výsledků byly navrženy dvě varianty simulačních výpočtů s rozdílnou teplotou lití. Původně uvažovaná varianta úpravy vtokové soustavy nebyla možná z důvodu složité následné změny modelového zařízení. Proto bylo přistoupeno na úpravy technologických veličin samotného procesu lití.

Při posuzování výsledků degradovaného bentonitu ve formovací směsi, byl na základě simulačních výpočtů potvrzen předpoklad, že s vyšší teplotou lití roste i podíl degradovaného bentonitu ve formovací směsi. To je způsobeno tím, že s vyšší teplotou

lití se forma více prohřívá a tudíž je větší množství směsi zasaženo degradační teplotou. U varianty 1, s teplotou lití 1470°C, bylo stanoveno množství tepelně degradované směsi na 1,3 kg a z toho 0,116 kg činí degradovaný bentonit. U varianty 2, s teplotou lití 1420°C, byly hodnoty o něco nižší, množství tepelně degradované směsi činí 1,071 kg a z toho je 0,095 kg degradovaného bentonitu.

Na základě získaných výsledků simulačního výpočtu hodnot degradovaného bentonitu, bylo stanoveno množství bentonitu potřebného pro oživení formovací směsi. Toto množství se skládá ze dvou hodnot, z bentonitu potřebného na doplnění k novému ostřívu a z bentonitu potřebného na doplnění k vratné směsi. První hodnota je u obou variant stejná, jelikož se do mísené dávky přidává vždy stejné množství nového ostříva. Druhá hodnota byla stanovena právě z množství degradovaného bentonitu získaného simulačním výpočtem. Sečtením obou hodnot bylo získáno množství nového bentonitu potřebného pro oživení formovací směsi, které pro variantu 1 činí 5,19 kg a pro variantu 2 činí 4,65 kg. Při porovnání výsledných hodnot (obou variant), s reálnou hodnotou množství nového bentonitu používanou ve slévárně k oživení formovací směsi, která činí 4,5 kg, bylo zjištěno, že dávkování slévárny je dle simulačního výpočtu lehce poddimenzované. Průměrně by tedy bylo vhodné přidat na každé oživení cca 0,5 kg nového bentonitu.

Výsledky simulačních výpočtů také ukázaly, že minimální teplota, kterou má tavenina kovu, když poprvé smočí danou část formy u varianty 1 je 1346°C, u varianty 2 je 1314°C. Obě tyto teploty jsou poměrně vysoko nad teplotou likvidu, která je zde 1173°C. V úvahu by tedy přicházelo snížit lící teplotu, což by mělo pozitivní vliv na snížení množství degradované formovací směsi. Avšak bylo by nutné simulačním výpočtem ověřit, zda vlivem nižší teploty lití nedochází např. ke vzniku studených spojů a k nárůstu porozity odlitků, případně ke vzniku jiných vad. Vyhodnocením výsledků simulačního výpočtu odlitků písních kroužků se zaměřením na porozitu bylo zjištěno, že s nižší teplotou lití hodnota porozity stoupá. Tím také stoupá riziko vad v odlitcích písních kroužků.

Jak je z výše uvedeného patrné, procesy v pískových bentonitových formách při utváření odlitků jsou velmi komplikované. Dochází např. k přehřívání formy a k rozměrovým dilatacím těchto forem. Zkoušení bentonitových směsí vyžaduje důkladnou pravidelnou kontrolu všech sledovaných parametrů těchto směsí v rámci slévárenské výroby. Ke sledování mechanických vlastností formovacích směsí jsou

profesionálně sestavena měřicí zařízení. Nedílnou součástí, která ovlivňuje výsledné vlastnosti komplexní slévárenské směsi jsou také ostřiva. Ostřiva dávají formovací směsi žáruvzdornost. Jak je obecně známo, ostřiva se dělí na kyselá, neutrální a zásaditá. Nevhodná kombinace typu ostřiva a charakteru odlévaného materiálu může vést k neopravitelným vadám tzv. připečeninám. Dále dochází z hlediska použití jednotné bentonitové směsi k tzv. oolitizaci ostřiva, kdy na povrchu ostřiva vzniká zdegenerovaná vrstva, která snižuje kvalitu ostřiva. V tomto stavu již tento typ ostřiva není vhodný pro výrobu kvalitních odlitků. Z tohoto důvodu se ve slévárnách provádí pravidelné „oživování“ formovací směsi.

10. ZÁVĚR

Tato habilitační práce je zpracována na téma: „*Příspěvek k poznatkům o jakosti vybraných slévárenských materiálů forem a vlivu jejich parametrů na kvalitu odlitků*“ a přispívá ke komplexnějšímu pohledu na tepelnou zátěž formovacích a jádrových směsí pro výrobu kvalitních odlitků, především pro české slévárenství.

Cílem této habilitační práce je souhrnně ukázat studentům slévárenských oborů složitost výroby forem a následně i výrobu kvalitních odlitků. Práce popisuje charakteristiky pískových forem a jejich složek s ohledem na vysvětlení studentům potřeby měření těchto užitných a mechanických vlastností pískových slévárenských směsí. Dále práce popisuje možné využití výsledků těchto měření jako vstupních dat potřebných pro potřeby simulačních výpočtů ve slévárenství, případně pro verifikaci všech tepelně fyzikálních veličin. Složitost tepelně – fyzikálních veličin pískových materiálů souvisí především s jejich strukturou a složením, neboť většinou jde o polydisperzní vícesložkové systémy. Vysoké teploty taveniny pak tyto složky zahřívají až degradují. Formovací materiály se neustále vyvíjejí ale tepelné děje v odlitcích a slévárenských formách si uchovávají svou základní fyzikální podstatu.

Dále jsou v práci popsány mechanismy vzniku a vývinu plynů a par v pískových formách s popisem vzniku kondenzační zóny. Současně v této části práce jsou popsány metody sledování plynotvornosti a dilatace.

Práce je rozdělena do 10 na sebe navazujících kapitol, jež jsou součástí tří hlavních částí - rešeršní, výpočtové a experimentální. Všechny kapitoly této habilitační práce přispívají k ucelené charakteristice vlivu tepla na vlastnosti pískové slévárenské formy, kde pro výrobu kvalitních odlitků je důležitým fenoménem plynotvornost, teplotní roztažnost, znalost tepelně - fyzikálních veličin pro všechny elementy použité při lití reálného odlitku a v neposlední řadě využití všech těchto znalostí jako podklady pro slévárenské simulační výpočty.

Experimentální část práce se zabývá sledováním plynotvornosti a dilatací konkrétních slévárenských směsí se zaměřením na sledování bentonitových směsí. Současně jsou v této části zhodnoceny u slévárenských směsí i výsledky posouzení plynotvornosti a dilatace způsobem, že jsou hledány závislosti obou těchto slévárenských vlastností.

Poznatky a výsledky z řešení této habilitační práce lze shrnout do těchto dílčích závěrů:

1) Navržené, odzkoušené a použité zařízení pro měření plynotvornosti splňuje svou funkci, dobře registruje a zobrazuje časové průběhy plynotvornosti a pracuje s přesností $\pm 0,002$ V. Toto zařízení dále umožňuje analýzu naměřených dat pomocí vypracovaného programu a navrženého postupu. Na základě zkušeností z provedených měření vyplývá, že maximální hodnota plynotvornosti je dosažena v časovém okamžiku 120 s zahřívání vzorku směsi, dále již hodnota zůstává téměř konstantní. Proto je možno provádět měření plynotvornosti po dobu 120 s.

Vytvořená metodika měření plynotvornosti směsí je vhodná, lze ji tedy použít pro měření s následujícím postupem. Lodička z molybdenového plechu s navážkou měřené směsi o hmotnosti $1,00 \pm 0,001$ g je vložena do zahřívací komory zařízení. Po vložení se vstupní otvor utěsní pryžovým kónickým uzávěrem. Dále se na regulátoru ohřevu pece nastaví potřebná maximální teplota ohřevu vzorku a současně se k regulátoru ohřevu pece připojí výstup teplotního čidla v peci. Prostřednictvím programu počítače se pro zpracování výsledků v programu Microsoft Excel® nastaví tlak v měřicí soustavě na nulovou hodnotu. Po určité době, v důsledku uvolňování plynů ze zahřívání vzorku, se v měřicí soustavě postupně vytvářejí různé hodnoty změny tlaku, které jsou registrovány a snímány tlakovým čidlem pro určitý časový okamžik.

2) Mechanismus uvolňování plynů, jak z měření vyplývá, je charakteristický tím, že nejvyšší rychlost vývinu uvolněných plynů nastává hned na počátku měření, tj. na začátku odlévání. Proto je v tomto případě velice důležité, aby tlak uvolněných plynů byl menší, než tlak působící taveniny v dutině slévárenské formy.

Hlavní složkou slévárenských směsí, která má velký vliv na plynotvornost jsou pojiva. Největší plynotvornost vykazují organická pojiva (pryskyřice) a nejmenší plynotvornost mají pojiva na bázi vodního skla. Nevýhodou pojiv na bázi vodního skla je příliš velká zbytková pevnost, i když výrobci těchto směsí hledají řešení k její eliminaci.

3) Posouzením plynotvornosti bentonitů bylo zjištěno, že nejvyšší naměřená hodnota plynotvornosti činí $19,9 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, a to při měření bentonitových směsí za teploty 1200°C . Nejnižší hodnoty plynotvornosti byly naměřeny při teplotě 800°C při měření bentonitové směsi – a to $2,9 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Měřicí zařízení velmi přesně registruje a vykresluje průběhy plynotvornosti. Data jsou tříděna a zpracována dle navrženého postupu.

I přesto že bentonitové směsi vykazovaly stále rostoucí průběh bez limitních tendencí, po uplynutí doby 120 s lze již považovat povrch odlitku za natolik ztuhlý, že nadále nebude docházet k narušování povrchu odlitku bublinami.

4) Posouzením plynotvornosti obalovaných jádrových komplexních směsí v porovnání s jejich velikostními frakcemi (u směsí č. 1 až č. 6 měření plynotvornosti) byl potvrzen předpoklad, že menší frakce, které ve stejném objemu mají větší celkový povrch, vykazují větší plynotvornost. To bylo potvrzeno při měření plynotvornosti. Je to způsobeno tím, že ostřivo je díky většímu povrchu obaleno i větším množstvím pojiva, které se podílí na plynotvornosti směsi.

5) Bylo potvrzeno, že navržené, odzkoušené a použité zařízení pro měření dilatace splňuje svou funkci, exaktně registruje a zobrazuje časové průběhy dilatací a pracuje s přesností 0,001 mm. Toto zařízení dále umožňuje analýzu naměřených dat pomocí vypracovaného programu a navrženého postupu. Vzorky musí být v kompaktní podobě, oproti měření plynotvornosti, kde to není podmínkou. Doporučuje se použít vzorek o $\varnothing$ 8 mm a délce cca 50 mm.

6) Z mechanismu průběhu dilatace a z provedených měření vyplývá, že se dilatace začne projevovat hned na počátku měření, a tedy v praxi na začátku odlévání. Proto je v tomto případě velice důležité, aby rozměry formy byly správně nastaveny dle požadavků rozměrů budoucího odlitku. Hlavní složkou slévarenských směsí, která má velký vliv na dilataci, jsou ostřiva. Menší hodnotu dilatace vykazují směsi s větším rozptylem velikosti středního zrna ostřiva (d_{50}). Dále menší hodnoty dilatace mají směsi s ostrohrannějším ostřivem. Naopak směsi s kulatým tvarem ostřiva vykazují větší hodnotu dilatace. Kulaté ostřivo je právě typické pro jádrové směsi, kde se využívá poznatku, že koule je geometrický útvar, který má při maximálním objemu minimální povrch. To je příznivé pro potřebu menšího množství pojiva, kterým bývají plynotvornější pryskyřice (např. oproti vodnímu sklu). V této souvislosti je také třeba uvést, že ostřivo křemenného charakteru vykazuje během ohřevu modifikační přeměny, které jsou spojeny i s rozměrovými změnami.

7) Na dilataci má velký vliv charakter ohřevu. Podle dosažených výsledků hodnot dilatací je zřejmé, že na časový průběh dilatace má velký vliv i charakter ohřevu. Postupný ohřev vzorku způsobuje pozvolný náběh dilatace s probíhajícím časem, naopak ohřev vzorku tepelným šokem vykazuje strmější náběh dilatace. V tomto případě není vzorek prohřátý rovnoměrně a více dilatují povrchové části vzorku, které

jsou prohřátý na vyšší teplotu, než jeho vnitřní partie. Jakmile dojde k prohřátí vzorku v celém objemu, hodnota dilatace má pak podobný průběh jako dilatace vzorku při postupném ohřevu. Vzhledem k tomu, že reálné odlévání se podobá svým charakterem spíše měření při šokovém ohřevu vzorku, protože je nutné taveninu odlévaného kovu nalít do dutiny formy co nejrychleji bez dlouhých časových prodlev, proto většina experimentů měření dilatace, v této práci, je měřena právě v podmínkách ohřevu vzorku šokem.

U směsí s křemenným ostřivem je patrná změna průběhu grafické závislosti, která se vyznačuje postupným nárůstem dilatace a to důsledkem změny β křemene v α křemen. Tato přeměna by měla probíhat při teplotě 573 °C, což odpovídá naměřeným průběhům. K vyšší hodnotě dilatace jednoznačně přispívá křemenné ostřivo. To také potvrzují naměřené hodnoty u směsí č. I až č. V, obsahující různé typy křemenného ostřiva Střeleč. Maximální hodnoty dilatace jsou téměř shodné při teplotách 800 °C a 1000 °C a pohybují se okolo 0,7 % původní délky měřeného vzorku. Maximální hodnota dilatace u směsí č. VI až č. XI je opět na obou teplotách pro každý vzorek téměř shodná. Průměrně se hodnoty dilatace u směsí č. VI až č. XI pohybují kolem 0,1 % původní délky měřeného vzorku a méně.

8) Vytvořená metodika výpočtu hodnoty součinitele teplotní roztažnosti byla správná, což potvrdily výpočtem zjištěné hodnoty. Ty byly vypočítány informativně na základě využití grafické závislosti dilatací na teplotě. Při porovnání vypočítaných hodnot teplotní roztažnosti slévarenských směsí č. I až č. V (obsahující různé typy křemenného ostřiva Střeleč) s tabulkovými, pokud byly vůbec nalezeny, lze konstatovat, že vypočítané hodnoty se nejvíce blíží k hodnotám kolem teplot 100 °C. Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti při vyšších teplotách prakticky fyzikální tabulky téměř neuvádí, to se týká také hodnot teplotní roztažnosti křemene při vyšších teplotách. Více se tabulkovým hodnotám blíží vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti zjištěné na základě ohřevu tepelným šokem, než postupným ohřevem. Vypočítané hodnoty součinitele teplotní roztažnosti (směsí č. I až č. V) dosahovaly hodnot od $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (pro rozsah teplot do 100 °C) do $133,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (pro rozsah teplot do 1000 °C). Tak např. tabulkové hodnoty čistého křemene pro teplotu do 100 °C činí $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. U vzorků č. I a č. II. byla pro teplotu do 100 °C vypočítána shodná hodnota součinitele teplotní roztažnosti $7,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

9) Při posuzování souvislostí mezi plynotvorností a dilatací vybraných směsí, je možno konstatovat, že momentu začátku vývinu plynů (počátku plynotvornosti) odpovídá počátek rozměrových změn směsi. Další závislosti již souvisí s typem měřeného vzorku a s podmínkami experimentu.

10) Výpočtová část práce je věnována teoretickým výpočtům uvolněných plynů a výpočtům změn Gibbsovy energie. Na základě získaných hodnot lze konstatovat:

a) u chemických rovnic, které obsahují kyslík s uhlíkem za vzniku jeho oxidů, vzniká spálením 1 g uhlíku $1,87 \text{ dm}^3$ plynu. Pokud probíhá reakce mezi uhlíkem a jeho oxidem, množství vzniklého plynu, ze stejného množství uhlíku, je dvojnásobné. Stejně množství uvolněných plynů vzniká reakcí uhlíku s vodní párou.

b) až trojnásobné množství uvolněných plynů, které vzniká u reakcí uhlíku a vodní páry za vzniku oxidu uhličitého. Dále bylo zjištěno výpočtem, že z 1 dm^3 metanu vznikne dvojnásobné množství vodíku.

Mechanismus uvolňování plynů, potvrzený na základě experimentů prokázal, že největší rychlost vývinu uvolněných plynů nastává v počátku měření, resp. v počátku odlévání. V tomto případě je důležité, aby tlak plynů uvolněných z formy nebo jádra byl menší, než tlak působící taveniny v dutině formy.

Podle hodnot výpočtů Gibbsovy energie (Gibbsova energie je termodynamický potenciál, který je mírou průběhu dějů při konstantní teplotě a konstantním tlaku) je možno posoudit, zda daná reakce v konkrétních podmínkách proběhne, a zda bude mít svůj přínos do celkového objemu uvolněných plynů.

Výpočty prokázaly, že k plynotvornosti nejvíce přispívají reakce uhlíku s kyslíkem, popř. uhlíku s oxidy nebo uhlíku s vodou.

Voda ve směsích první generace pojivových systémů, je důležitou složkou směsi a tvoří plastifikátor, který přispívá k její formovatelnosti.

Za přítomnosti oxidovadel může probíhat spalování organických látek obsažených ve formovacích a jádrových směsích. Nejčastějším oxidovadlem je O_2 ze vzduchu (jež je uzavřen v pórech směsi). Dalším možným oxidovadlem je např. vodní pára nebo oxid uhličitý. Současně jsou významné reakce oxidace tuhého uhlíku za vzniku CO_2 nebo CO. Dokonalé spalování uhlíku za vzniku CO_2 je možné jedině za zajištění dostatečného přístupu vzduchu do oblasti možné reakce. Dále bylo potvrzeno, že hodnota Gibbsovy energie na teplotě reakce $\text{C (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} = \text{CO}_2 \text{ (g)}$ vykazuje přímku, která je rovnoběžná s osou x a na ose y vytíná hodnotu $-393\,777 \text{ J}$, z pohledu fyzikální

chemie jde tedy o reakci exotermickou. Tato reakce je také známá z Ellinghamova diagramu, který je v metalurgii velmi využíván.

11) Simulační výpočty tuhnutí a chladnutí jsou nedílnou součástí teorie a praxe výroby odlitků. Jsou vhodným nástrojem pro zvýšení kvality výroby odlitků, ale také využitelné při výuce studentů jako nástroj sloužící k vizualizaci a názorné ukázce probíhajících základních fyzikálních dějů během odlévání a následného tuhnutí odlitků.

Pro věrohodnou a verifikovanou simulaci slévárenského procesu jsou nutné teplotní závislosti tepelně – fyzikálních veličin všech použitých materiálů (měrná tepelná kapacita, latentní teplo tuhnutí, teplota tuhnutí, hustota, součinitel tepelné vodivosti, součinitel přestupu tepla). Provedené simulační výpočty s použitím programu Magma5 na odlitcích písních kroužků jsou dostačující. Simulační výpočty potvrdily místa výskytu vad, které se vyskytovaly i na vyrobených odlitcích. Takovéto simulační výpočty jsou prováděny na KSP TU v Liberci také při výuce studentů oboru slévárenství. Volba odlitku písního kroužku z litiny s lupínkovým grafitem je ilustrativně velmi výhodná a to i z hlediska didaktického, protože litinové odlitky tenkých rozměrů jsou náchylné na vznik zákalky. Ohledně výroby litinových drobných odlitků lze na základě výsledků obsažených v této práci konstatovat: Vznik bublin v odlitku je především zapříčiněn zahlcením vzduchu vlivem špatné prodyšnosti formy, případně plyny uvolněnými z formovací směsi. Vady odlitků písních kroužků predikované simulačními výpočty řešenými v rámci této habilitační práce se shodují s vadami na reálných odlitcích. Množství degradovaného bentonitu u varianty 1, tedy varianty lité z teploty 1470°C, činí 0,116 kg, u varianty 2, která byla lita z teploty 1420°C, činí 0,095 kg. Výsledky potvrzují předpoklad že množství degradovaného bentonitu roste s vyšší teplotou lití.

Práce komplexně shrnuje a rozšiřuje poznatky o plynotvornosti, dilataci a dalších vlastnostech formovacích a jádrových směsí, které vznikají v důsledku tepelného zatížení slévárenských forem a jader.

Poznatky a závěry této habilitační práce budou uplatněny při výuce studentů a dále při řešení technologických problémů a návrhů vhodných materiálů pro výrobu kvalitních slévárenských forem v našich slévárnách, včetně cíleného využití matematických simulačních výpočtů vedoucích k optimalizaci slévárenské výroby a výrobě konkurenceschopných odlitků.

Habilitační práce byla vypracována podle vysokoškolského zákona 111/1998 Sb., dle paragrafu 72.

V této souvislosti bych chtěl doplnit že k vypracování habilitační práce jsem byl vyzván děkanem Fakulty strojní TU v Liberci, prof. Dr. Ing. Petrem Lenfeldem dne 27.4.2014 při osobním jednání v souvislosti s pozitivním hodnocením mé dosavadní odborné i pedagogické činnosti a dále dne 24.4.2015 při dalším jednání a kontrole činnosti v rámci přípravy habilitačního řízení.

Tato práce tedy zohledňuje mé pedagogické dovednosti, které by měly přispět k didakticky kvalitní výuce mých studentů v rámci slévárenských předmětů a celkově přispět k rozvoji slévárenského oboru v ČR. Téma práce bylo zvoleno také na základě požadavků průmyslu dle dlouholeté spolupráce naší katedry s různými typy sléváren, především v České republice, a byl vybrán právě na základě zpětné pozitivní odezvy spolupráce na společných vědecko-výzkumných projektech případě projektech smluvního výzkumu.

Cílem této habilitační práce bylo vytvoření uceleného přehledu poznatků o jakosti vybraných slévárenských materiálů forem a jejich vlivu na kvalitu odlitků, což by mohlo přispět i ke zlepšení výroby odlitků v České republice.

SEZNAM LITERATURY

- [1] KALOUSEK, J., KALOUSKOVÁ, G., HOLUBEC, Z.: Fyzikální chemie metalurgických procesů. [Skripta]. FS,VŠST Liberec 1990.
- [2] PETRŽELA, L.: Slévárenské formovací látky. 1. vyd. Praha 1955.
- [3] RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta]. Praha 1981.
- [4] RUSÍN, K.: Formovací hmoty. [Skripta]. Praha 1972.
- [5] RUSÍN, K.: Teorie slévárenských procesů I. [Skripta]. Praha 1987.
- [6] JELÍNEK, P.: Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí, Ostrava 2004.
- [7] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi – III. část, [Skripta]. VŠB Ostrava 1984.
- [8] PAVLŮ, K.: Hodnocení plynatvornosti jádrových směsí používaných ve slévárně LIAZ Liberec. [Diplomová práce], FS-KSM, VŠST Liberec 1983.
- [9] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi – II. část. [Skripta]. VŠB – TU Ostrava, 1996.
- [10] PROCHÁZKA, K.: Hodnocení plynatosti formovacích a jádrových směsí používaných ve slévárně LIAZ Liberec. [Diplomová práce]. FS-KSM, VŠST Liberec 1981.
- [11] BAUEROVÁ, M.: Měření plynatosti jádrových směsí s pryskyřičnými pojivy, [Diplomová práce], FS- KSM, VŠST Liberec 1992.
- [12] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách, TU v Liberci 2002.
- [13] NOVÁ, I.:Teorie slévání – I. díl, FS-KSP, TU v Liberci 2007.
- [14] SEIDL, M.: Sledování plynatosti slévárenských formovacích směsí.Zvláštní číslo časopisu Strojírenská TECHNOLOGIE 2005, s.160-162.
- [15] NOVÁK, R.: Vyhodnocení a porovnání plynatosti jádrových směsí používaných ve slévárně LIBEREC a.s. [Diplomová práce]. TU v Liberci, 1995.
- [16] JENČOVSKÝ, M.: Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi. [Bakalářská práce]. TU v Liberci, 2006.
- [17] RYŽEKIV, A., SPASSKI, J: Litejnoje proizvodstvo. Moskva 1961.
- [18] SEDLÁK, J.: Zkušenosti s výrobou skořepinových forem pro žebrované válce metodou horkých jaderníků, Slévárenství X, č. 11, 1962, s.425 – 427.
- [19] MÁCA, A., SEDLÁK, J.: Slévárenství XII, , č.11, 1964, s. 421 – 425.
- [20] ROTTER, L., FOŠUM, J.: Vlastnosti vazné formovací směsi s vodním sklem a bentonitem, Slévárenství XII, č.11, 1964, s.444-448.
- [21] HODAŇ, B.: Výroba termosetických jader v Moravských železárnách, Slévárenství XII, č.11, 1964, s. 469-472.
- [22] HIRSCH, H., EINERT, S., FISCHER, K.: Formovací směs pro lití velkých a tlustostěnných ocelových odlitků na syrovo, Giessereitechnik 11, č. 8, 1965, s. 236-239.
- [23] PYTLÍK, F., KOCOUREK, B.: Použití nového druhu pryskyřice při výrobě samotuhnoucích jader, Slévárenství XIV, 1966, č.1 s.16.
- [24] OTÁHAL, V., SCHNAIDER, G.: Směsi s modifikovanými škrobovými deriváty, Slévárenství XIV, č.1, 1966, s.11-13.
- [25] PAULÍČEK, R.: Kritický pohled formovacích a jádrových zmesí, Slévárenství XIV, č.2, 1966, s.70-73.
- [26] DVOŘÁK, J.: Technická močovina a její praktické využití při výrobě přesných odlitků, Slévárenství XIV, č.10 1966, .s. 429-430.
- [27] POZONEV, J. D.: Fyzikálně chemické vlastnosti bentonitů. Slévárenství XIV, č.12, 1966, s. 516-517.

- [28] ROUS, J., PODOLNÍK, B.: Rozbor vlivů směsi CT na tvoření trhlin u ocelových odlitků, Slévárství XIV, č.7, 1966, s. 275-279.
- [29] LEADBETTER, M., LINDOP, T.W.: Důležitost stanovení teplotní roztažnosti materiálů u přesného lití, Foundry Trade Journal, 119, No:2556, s. 761766, 1965. Překlad Slévárství XIV, 1966, č.5 s.257.
- [30] JELÍNEK, P.: Kritický přehled formovací a jádrových směsí, Slévárství XIV, č.8, 1966, s. 339-341.
- [31] MACÁŠEK, I., RUSÍN, K., JIRÁK, L.: Kombinovaná jádrová směs se zrychleným vytvrzováním, Slévárství XIV, č. 8, 1966, s. 316-319.
- [32] Příspěvek k morfologii zrnových obálek vodního skla, Slévárství XVI, č.1, 1968, s. 9-11.
- [33] DOŠKÁŘ, GABRIEL, J.: Vliv obalové hmoty a sušení obalů na pevnost keramických forem, Slévárství XVI, č.1, 1968, s.16-17.
- [34] JELÍNEK, P.: Vliv Al_2O_3 na rozpadavost směsí CT, Slévárství XVI, č.2, 1968, s.71-74.
- [35] PAULÍČEK, R., HRIVNAK, M.: Stekucené formovacie zmesi s vodným sklom. Slévárství XVI, č. 4/5, 1968, s.141-144.
- [36] MACÁŠEK, I., RUSÍN, K.: Použití karbamidových směsí pro výrobu slévárenských forem a jader, Slévárství XVI, č.4/5, 1968, s. 158-161.
- [37] BURIAN, A., POLÁŠEK, B.: Anorganické pojivo pro směsi vytvrzované vzduchem, Slévárství XXIV, č.2/3, 1970, s.42-46.
- [38] BODEČEK J.: Kontrola formovací směsi, Slévárství XX, č.3 s. 100-104, 1972.
- [39] Statistická metoda hodnocení granulometrické skladby umělých ostřiv, Slévárství XX, č.2, 1972, s.68-69.
- [40] ŠEVČÍK, F., GABRIEL, J.: Měření roztažnosti a pevnosti skořepin z vybraných žáruvzdorných materiálů pro přesné lití, Slévárství XX, č.4, 1972, s. 155-158.
- [41] BURIAN, A.: Další způsob ovladatelného ztužování jader, Slévárství XX, č. 5/6, 1972, s. 183-184.
- [42] JELÍNEK, P.: Použití kriteria zrnitosti log w ke stanovení optimálního poměru dvou a více frakcí při přípravě ostřiv, Slévárství XXI, č.1, 1973, s.8-15.
- [43] HANAL, S., RŮŽIČKA, A.: Studium granulometrické skladby plniva u organických formovacích směsí, Slévárství XXI, č.8, 1973, s. 335-339.
- [44] ELBEL, T., JELÍNEK, P.: Příčiny a důsledky cristobalitické expanze směsí s vodním sklem. Slévárství XXI, č.9 1973, s. 353-360.
- [45] JELÍNEK, P.: Studium obecných zákonitostí destrukcí slévárenských formovacích směsí, Slévárství XXI, č.12, 1973, s. 514-518.
- [46] ANGELOV, G.: MOKEDONSKI, Z., DOBREM, P., WOLKOW, W.: Výroba jader metodou Hot- Box s použitím směsí obsahujících polyvinilalkohol a zvláštní přísady, Giessereitechnik, č. 12, 1973, s. 419-422.
- [47] MACA, A., KRÁLÍK, J.: K některým otázkám použití samotvrdnoucích směsí Slévárství XXI, č.3/4, 1973, s. 89-95.
- [48] BURIAN, A.: Fenolické pojivové systémy pro směsi vytvrzené ve studených jadernících, Slévárství XXII, č.3-4 1974, s. 147-151.
- [49] VESELÝ, M.: Močovinné pryskyřice pro metodu horkého jaderníku, Slévárství XXII, č.10, 1974, s. 416-419.
- [50] PAVLISKA, S.: Výrobou jader na bázi Gisanolu H, B- Incook použitím automatické linky vlastní výroby, Slévárství XXIII, č.3/4, 1975, s. 116-117.
- [51] DLAZEK, J.: Samotuhnoucí směsí s dostupnými fenolickými pryskyřicemi, Slévárství XXIV, č. 2/3, 1976, s. 100-104.

- [52] VESELÝ, M.: Možnosti využití domácích močovinoformaldehydových pryskyřic, Slévárenství XXIV, č.2/3, 1976, s.104-107.
- [53] KRÍSTEK, J., BURIAN, A.: Vlastnosti samotuhnoucích směsí s vodním sklem a kapalnými tvrdidly Esterol, Slévárenství XXV, č.3/4, 1977, s. 115-117.
- [54] BURIAN, A., KRÍSTEK, J.: Koloidní vlastnosti vodních skel. Slévárenství XXV, č.3/4, 1977, s. 125-128.
- [55] ULRICH, J., RUMLER, J.: Některé speciální metody pro zkoušení formovacích hmot, Slévárenství XXV, č.6, 1977, s. 225-228.
- [56] Podklady firmy AFS International Cast Metals Journal: Rozklad pojiv během odlévání forem a složení exhalací, Slévárenství XXVIII, č.1, 1979, s.14-15.
- [57] KRÍSTEK, J., BURIAN, A.: Příspěvek ke kinetice vytvrzování samotvrdnoucích směsí s vodním sklem a esterovými tvrdidly, Slévárenství XXVII, č. 11, 1979, s. 470-471.
- [58] STAVĚNÍČEK, V., HOLOUBEK, Z.: Zkušební metoda pro stanovení užitných vlastností samotvrdnoucích jádrových směsí, Slévárenství XXVIII, č.3/4, 1979, s. 160-163.
- [59] LEITGEB, O.: Zařízení a funkce laboratoře pro zkoušení slévárenských formovacích směsí, Slévárenství XXVII, č.9, 1979, s. 371-374.
- [60] FOŠUM, J.: Nové názvosloví v oblasti formovacích látek – II.část: formovací směsi pojivové soustavy a pojiva, Slévárenství XXVIII, č.4, 1980, s.164-168.
- [61] KLOBÁSKA, M., NOVOTNÝ, M.: Technologie Cold-Box-Amin v Zetoru, Slévárenství XLI, č.2, 1993, s.71-74, ISSN 0037-6825.
- [62] CHRÁST, J., MÜLLER, G., BURIAN, A.: Vícetupňová regenerace vratné furanové směsi se separací chromitu firmy GUT GmbH. Slévárenství XLIII, 1995, č. 1, s. 21-28. ISSN 0037-6825.
- [63] KRAMÁŘOVÁ, D., BRANDŠTETER, J., RUSÍN, K., HENZLOVÁ, P.: Biogenní polymerní materiály jako pojiva slévárenských forem a jader. Slévárenství LI, č.2-3, 2003, s. 71-73, ISBN 0037-6825.
- [64] HOLUBEK, Z. a kol.: Studium technologie a vlastností sádrových formovacích směsí. [Závěrečná zpráva výzkumného úkolu N 132]. VŠST - FS Liberec, 1980.
- [65] HORÁČEK, M., PAVELEK, M., RUSÍN, K.: K problematice tuhnutí odlitků ve skořepinových formách. Slévárenství XXXI, 1983, č. 6, s. 278-285.
- [66] HORÁČEK, M., KRČMÁŘ, V., ŠVIHÁLEK, A.: Aplikace elektro-fyzikálních metod k identifikaci vytvrzování systému vodní sklo-Esterol. Slévárenství XXXIV, 1984, č. 1, s. 2-5.
- [67] JELÍNEK, P.: Přínos československého slévárenství k chemizaci výroby forem a jader na bázi alkalických křemičitanů. Slévárenství XLIV, 1996, č. 2, s.85-99, ISSN 0037-6825.
- [68] JELÍNEK, P., MIKŠOVSKÝ, F.: Anorganické pojivo Desil – J jako náhrada pojiv pro CO₂ – resol. Slévárenství LIV, 2006, č. 1, s. 7-9. ISSN 0037-6825.
- [69] BURIAN, A. et al.: Slévárenské směsi s geopolymerním pojivovým systémem. Slévárenství LIV, 2006, č. 1, s. 4 až 7. ISSN 0037-6825.
- [70] CUPÁK, P., RUSÍN, K.: Zkušenosti s výrobou a použitím jader s biogenním pojivem. Slévárenství LIV, 2006, č. 1, s. 19-21. ISSN 0037-6825.
- [71] BURIAN, A. et al.: GEOPOL technologie výroby forem a jader s anorganickým pojivem. Slévárenství LVII, 2009, č.1, s.7-11. ISSN 0037-6825.
- [72] LACHMAN, L., BRANDŠTETER, J., RUSÍN, K.: Deriváty celulózy jako pojiva slévárenských formovacích směsí – část I. Slévárenství LVII, 2009, č. 1-2, s.12-14. ISSN 0037-6825.

- [73] FOŠUM, J., ŠEBESTA, B.: FOND-EX 2008 – novinky z oblasti formovacích materiálů a postupů výroby jader; měřicí přístroje pro kontrolu formovacích materiálů a řízení procesu přípravy směsí. Slévárnictví LVI, 2008, č. 5-6, s. 243 - 247. ISSN 0037-6825.
- [74] JELÍNEK, P.: GIFA 2007 – novinky v oblasti pojiv, ostřiv a nátěrů v technologických postupech výroby forem a jader. Slévárnictví LV, 2007 č. 8-9, s. 388 - 391. ISSN 0037-68.
- [75] BEDNÁŘOVÁ, V.: Možnosti bezodpadové technologie ve slévárnictví. [Habilitační práce]. FMMI, VŠB – TU, Ostrava 2008.
- [76] MÜLLER, J., TEGEL, M.: Inovativní řešení pro slévárny využívající anorganické principy. Slévárnictví LVI, 2008, č. 3-4, s. 120 - 122. ISSN 0037-6825.
- [77] SCHEREY, A.: Vysoce reaktivní polyuretanová pojiva pro postup Cold Box. Slévárnictví LVII, 2009, č. 1-2, s. 23 - 27. ISSN 0037-6825.
- [78] MEDVĚDĚV, J.I.: Gazy v litěnoh formě. 1. vyd. Moskva 1965.
- [79] ČERNOCH, S.: Strojné technická příručka. Třetí, upravené vydání, Praha 1977.
- [80] RAŽNJEVIČ, K.: Tepelné tabulky a diagramy. 1. vyd. Bratislava 1969.
- [81] Technické materiály o přístroji PGD švýcarské firmy +GF+.
- [82] KUCHAR, L., DRÁPALA, J.: Tabulky vybraných vlastností kovů. VŠB Ostrava 1979.
- [83] PÍŠEK, F. a kol.: Nauka o materiálu I (Nauka o kovech 3. svazek – Neželezné kovy), druhé, rozšířené, zcela přepracované vydání. Praha, 1979.
- [84] TIETL, J.: Studium a měření dilatačních vlastností formovacích a jádrových směsí [Diplomová práce]. KMM-FS, VŠST v Liberci 1985.
- [85] NOVÁ, I.: Tepelné zpracování forem ze sádrových směsí používaných při výrobě přesných odlitků [Kandidátská disertační práce], VŠST – FS Liberec, 1985.
- [86] TESÁREK, P., ČERNÝ, R.: Základní vlastnosti sádry k řešení grantu GAČR 103/03/0006, [Interní materiál Katedry stavební mechaniky Fakulty stavební, ČVUT], 2007.
- [87] HRABÁK, V a KOLEKTIV: Pístní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz. Hořovice: Reprografické studio CHARLIE s.r.o.
- [88] PICEK, P., MACHUTA, J.: Praktické použití progresivního způsobu ožívání bentonitové formovací směsi novým bentonitem. In: Sborník přednášek: XVIII. Bentonitové konference, prezentace výrobků a služeb pro slévárnictví. Beroun: KERAMOST a.s., 2014, str. 29-35.
- [89] FORMSERVIS, s.r.o. Hodnocení bentonitu a bentonitových směsí. Dokumentace kurzu pro pracovníky pískových laboratoří, Brno.
- [90] STABRYŁA, J.: Technologia metali i tworzyw sztucznych, Cz.1 Technologia odlewnictwa, Olsztyn, 2002.
- [91] STRAKOŠOVÁ, P.: Interakce ostřivo - pojivo u fenolického uretanového systému (PUR COLD BOX), Ostrava, 2006.
- [92] NOVÁ, I.: Slévárenské formy (Vybraní statě přednášek). [Interní výuková pomůcka]. Liberec, 1997.
- [93] JABŮREK, M.: Metody a zařízení pro zkoušení slévárenských formovacích látek, Brno, 1978.
- [94] HRUBOŇ, J. Výroba odlitků metodou odstředivého lití [online]. Zlín, 2011 [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14807/hrubo%C5%88_2011_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [95] Firemní materiály a podklady k produkovaným přístrojům firmy Multiserw-Morek, <http://www.multiserw-morek.pl> [online]. [cit. 2015-03-02].

- [96] MACHUTA, J.: Sledování vlastností formovacích a jádrových směsí během jejich tepelného namáhání, obhájenou v roce 2010 na TU v Liberci, Disertační práce, TU v Liberci, 2010.
- [97] NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I.: Užitný vzor: Zařízení pro měření plynatosti formovacích a jádrových směsí. Užitný vzor: Číslo dokumentu 20457. Zapsáno 25.1.2010.
- [98] ELBEL, T. : 1992. Vady odlitků ze slitin železa: Klasifikace, příčiny a prevence. Brno: Matecs.
- [99] OTÁHAL, V. : 2008. Vady odlitků - Atlas Vad Železné a neželezné slitiny. Brno: MCFC/TEP.
- [100] Magmasoft simulation software, MAGMA GmbH, Aachen, Germany
- [101] KOTAS, P.: Integrated Modeling of Process, Structures and performance in Cast Parts, PhD Thesis, DTU Mechanical Engineering, Lyngby, Denmark 2011.
- [102] CAMPBELL, J.: Castings, second edition . Elsevier Butterworth- Heinemann, (2003).
- [103] CAMPBELL, J.: Castings Practice, the 10 Rules of Castings, Elsevier Butterworth – Heinemann (2004).
- [104] TIEDJE, N.S, LARSEN, P.: Investigation of the stability of melt flow in gating systems, Metallurgical and Materials Transactions B, (2010).
- [105] ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, (1998).
- [106] BEELEY, P.: Foundry Technology, Second Edition, Butterworth-Heinemann, (2001).
- [107] FISCHER, K.: Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publications LTD, (1986).
- [108] BONOLLO , F., ODORIZZI, S.: Numerical Simulation of Foundry Processes, S.G.E, (2001).
- [109] GREFHORST, C.: Prüfung von Bentoniten. Giesserei, 93, č.5, s. 26-31, 2006.
- [110] LA FAY, V.S.: Significant Reduction in the Emission Characteristics of the Green Sand.

PŘÍLOHY

Seznam příloh

Příloha č. 1 - Granulometrická skladba ostřiva

Příloha č. 2 - Přístroje pro měření vlastností slévárenských materiálů

Příloha č. 3 - Přehled základních metod výroby forem a jader

Příloha č. 4 - Teoretické výpočty objemu uvolňovaných plynů

Příloha č. 5 - Výběr termodynamických hodnot prvků a sloučenin

Příloha č. 6 - Příklady výpočtu změny Gibbsovy energie u některých chemických reakcí uvolňování plynů z formovacích a jadrových směsí

Příloha č. 7 - Zařízení použité pro měření plynotvornosti na KSP TU v Liberci

Příloha č. 8 - Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 9 - Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

Příloha č. 10 - Zařízení pro měření dilatace na KSP TU v Liberci

Příloha č. 11 - Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření dilatace

Příloha č. 12 - Souhrnné výsledky realizovaných experimentů měření dilatace

Příloha č. 13 - Výsledky výpočtů změn Gibbsovy energie

Příloha č. 14 - Vlastnosti sledovaných jednotných bentonitových směsí

Příloha č. 15 - Výpočty oživení jednotné formovací bentonitové směsi

Příloha č. 16 - Základní statistické výpočty naměřených hodnot

Granulometrická skladba ostřiva

Příloha č. 1

Pro posouzení vlastností formovacích směsí je také důležitá granulometrická skladba ostřiva. Čisté ostřivo se prosévá řadou sít, která jsou na speciálním zařízení. Obrázky tohoto zařízení a obrázky jednotlivých sít jsou v této příloze. Pro naše potřeby a určení granulometrické skladby používáme navážku 50 g směsi. Ostřivo je zbavené vyplavitelných podílů, tj. částic < 0,02 mm, což mohou být jíly, živce, prachové podíly; prachové podíly se zbavují zkouškou vyplavitelnosti. Síta mají velikost ok 0,06; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6; 1,0; 1,5 [mm]. Tato zkouška se nazývá také síťový rozbor. Sledují se podíly zachycené na jednotlivých sítích a vyjadřují se v procentech původní navážky.

Součtová křivka je uvedena na obrázku v této příloze, kreslí se v semilogaritmických souřadnicích. Na svislou osu se nanáší procenta ostřiva zachycená na jednotlivých sítích [%]. Na vodorovnou osu, která má logaritmickou stupnici, se nanáší velikost ok sít [mm]. Průsečík součtové křivky s přímkou označující kritickou velikost částice - ostřiva (0,02 mm) je bod vyznačující 100 % ostřiva. Tuto 100 % část rozdělíme na úseky vymezující 25, 50, 75 % a k těmto hodnotám přiřadíme na vodorovné odpovídající velikosti zrna, jež označíme d_{25} , d_{50} , d_{75} .

Tabulka vyznačuje příklad výpočtu granulometrické skladby ostřiva

Třída zrnitosti [mm]	Hmotnost frakcí [g]	Celkové množství ostřiva zachycené na jednotlivých sítích [%]
1,5	0,43	$0,43 \cdot 100 / 100 = 0,43$ [%]
1,5 - 1,0	0,74	$(0,43 + 0,74) \cdot 100 / 100 = 1,17$ [%]
1,0 - 0,6	5,61	$(0,43 + 0,74 + 5,61) \cdot 100 / 100 = 6,78$ [%]
0,6 - 0,3	34,27	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27) \cdot 100 / 100 = 41,05$ [%]
0,3 - 0,2	34,02	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02) \cdot 100 / 100 = 75,07$ [%]
0,2 - 0,1	20,80	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80) \cdot 100 / 100 = 97,31$ [%]
0,1 - 0,06	1,44	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80 + 1,44) \cdot 100 / 100 = 97,31$ [%]
0,06 - 0,02	0,94	$(0,43 + 0,74 + 5,61 + 34,27 + 34,02 + 20,80 + 1,44 + 0,94) \cdot 100 / 100 = 98,25$ [%]
Celkem:	98,25 g	1,75 g jsou vyplavitelné látky

d_{50} - velikost středního zrna (je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 50 % daného ostřiva);

d_{25} - je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 25 % daného ostřiva;

d_{75} - je to myšlená velikost ok síta, na kterém se zachytí 75 % daného ostřiva.

Součtová křivka pro síťový rozbor



Na základě síťového rozboru se ostřivo hodnotí:

- podle velikosti středního zrna (d_{50});
- podle pravidelnosti zrnitosti, neboli stupně stejnoměrnosti ($s = d_{75}/d_{25}$).

Čím je hodnota $s = d_{75}/d_{25}$ bližší 1, tím jsou zrna ostřiva stejnoměrnější a součtová křivka je strmější. S klesající hodnotou s je součtová křivka plošší a zrna ostřiva jsou velikostně různorodá. Charakter a tvar zrn ostřiva má velký vliv na technologické vlastnosti formovacích směsí. Ostřiva kulatá jsou lépe zpěchovatelná, tím má formovací směs i větší tekutost, avšak větší náchylnost na vznik vad odlitku - zálupů. Proto je vhodnější pro syntetické bentonitové směsi je ostřivo poloostrohranné se sníženou možností spěchování. U jádrových směsí je tomu naopak. Kulatá zrna ostřiva s hladkým povrchem se lépe povlékají vrstvou olejového nebo pryskyřičného pojiva. Ve spěchované směsi kulatá zrna ostřiva vytvářejí více kontaktních míst a směs dosahuje vyšší pevnosti po vysušení, než formovací směs s ostrohranným ostřivem. Kulatý tvar ostřiva sníží spotřebu jádrového pojiva o 0,5 až 1,0 %.



a)

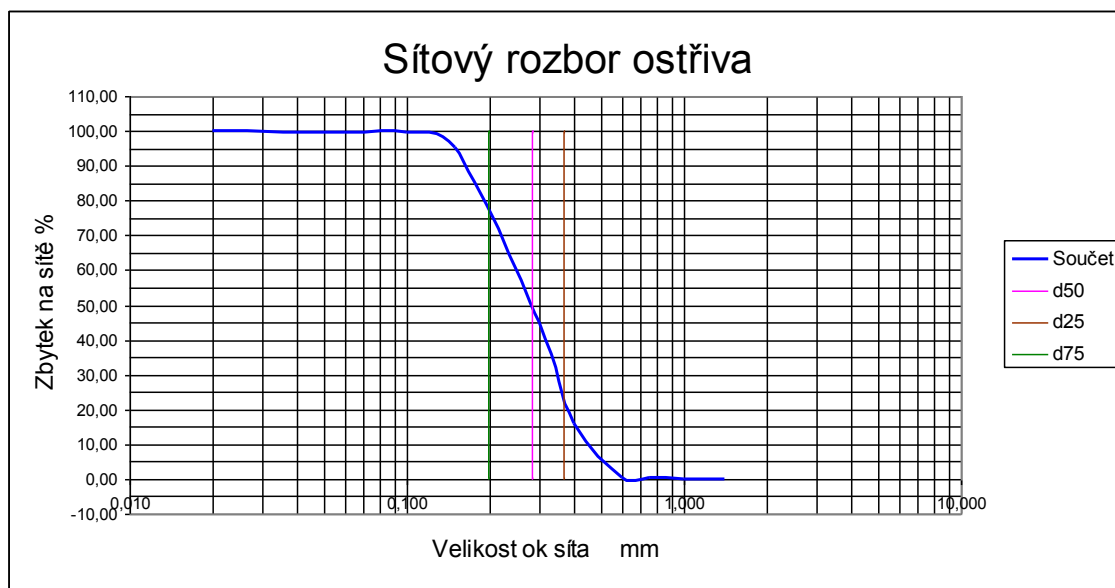
b)

a) *prosévací stroj Zbrojovka Brno* b) *prosévací stroj LPzE-2e Multi-serw Morek*

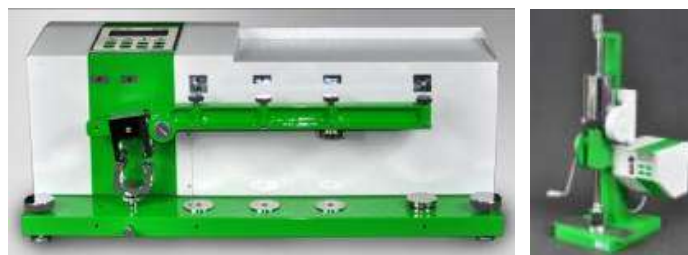
Přístroje pro stanovení velikosti zrn ostřiva

Výsledky síťového rozboru měřených jádrových ostřiv pro směs č. 1 – 15731 ,
sypká obalovaná směs Hüttenes -Albertus (skupina vzorků)

Hodnoty síťového rozboru směsi 15731			
Sítový rozbor	č.1	č.2	Průměrné hodnoty
1,5	0	0	0
1	0	0	0
0,75	0,1	0	0,1
0,6	0,2	0,1	0,15
0,4	7,75	7,7	7,725
0,3	14,65	14,3	14,475
0,15	24,9	25,3	25,1
0,1	2,3	2,2	2,25
0,06	0	0	0
0,02	0,1	0	0,1



S_{th} Teoretický povrch cm^2/g :	85,69
MK_{calc} Střední velikost zrn mm	0,292
d_{50} mm:	0,283
d_{75} mm:	0,197
d_{25} mm:	0,369



**Univerzální přístroj k měření pevnosti LRu- 2e (vlevo) a přístroj pro pýchování
zkušebních těles (vpravo)**



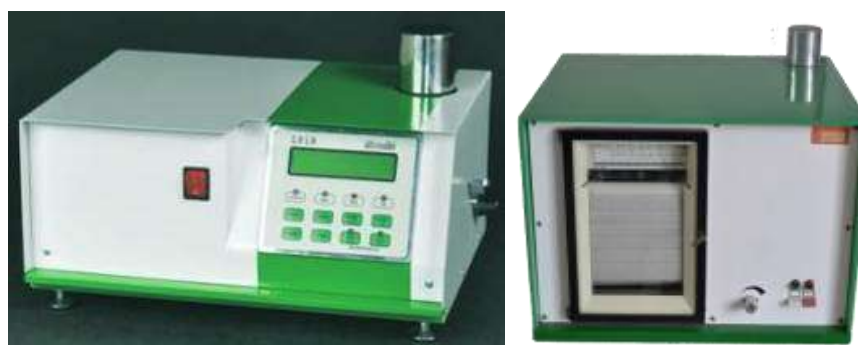
a)



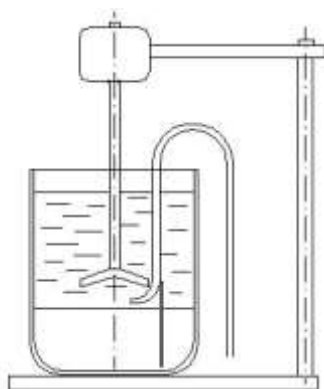
b)

a) otevřený analyzátor vlhkosti b) analyzátor vlhkosti při sušení

Analyzátor vlhkosti MAC 50/NH firmy RADWAG



Přístroje pro stanovení prodyšnosti



a)



b)

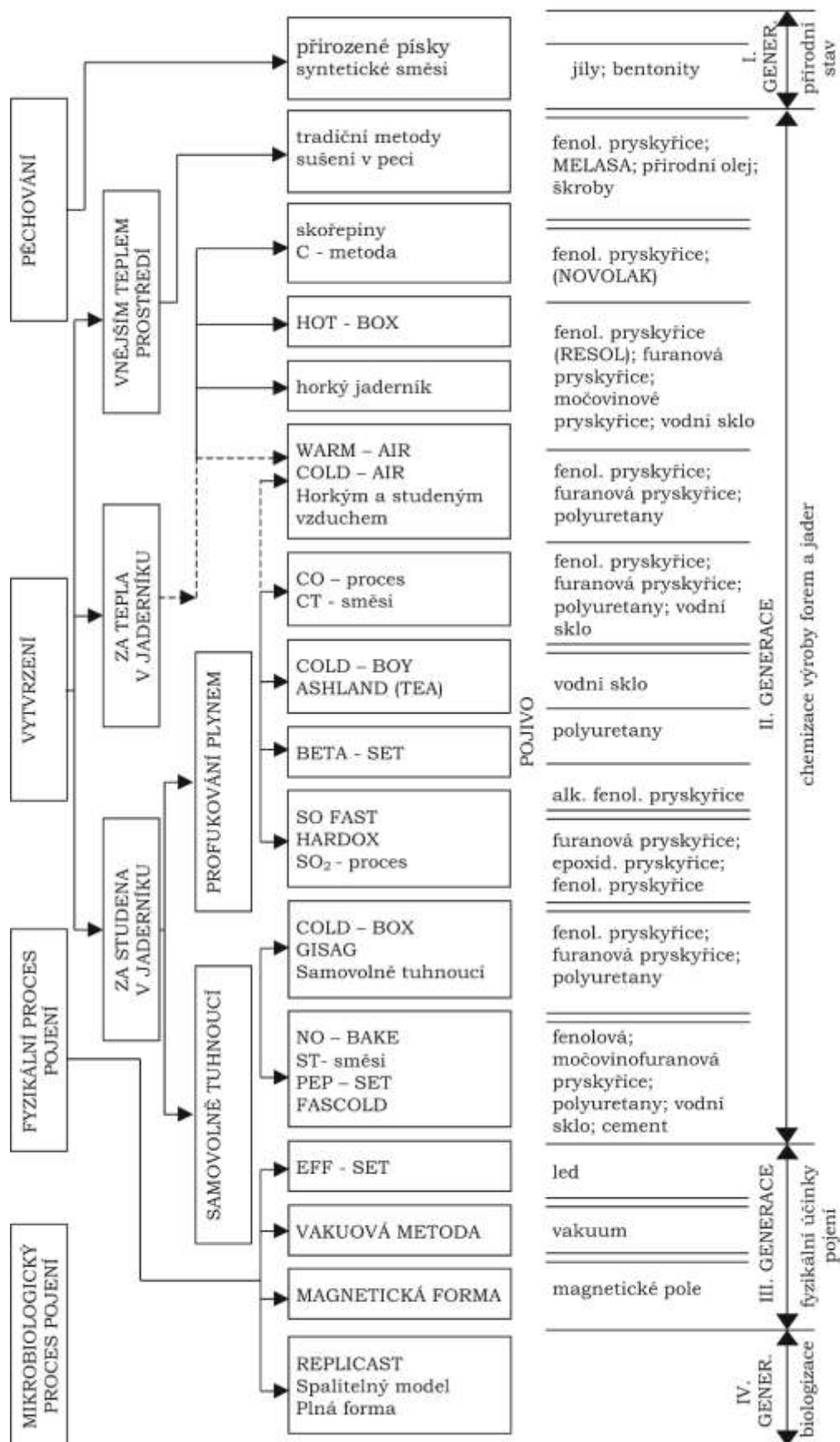
a) schéma přístroje k měření množství vyplavitelných látek

b) přístroj k měření množství vyplavitelných látek (LSz-2 Multiserw)

Sestava určená k měření množství vyplavitelných látek



Pohled na pracoviště a uspořádání zařízení při měření dilatace směsí



Vzorce potřebné k výpočtu:

$$n = \frac{m}{M}; n = \frac{V}{V_m};$$

kde značí: n - látkové množství [mol]; m - hmotnost [g]; V - objem [dm³];
 M - relativní molekulovou hmotnost [g.mol⁻¹]; $V_m = 22,41$ [dm³ . mol⁻¹]

Stanovení relativní molekulové hmotnosti

$M = x$ [g.mol⁻¹] ($C - 12,01$; $O_2 - 31,999$; $CO_2 - 44,010$; $CO - 28,01$; $H_2O - 18,015$; $H_2 - 2,0158$; $Fe - 55,847$; $FeO - 71,8469$; $Fe_3O - 183,54$; $CH_4 - 16,0426$; $CaCO_3 - 100,088$; $CaO - 56,0799$);

$C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow CO_2(g)$	z 1 g C(s) vznikne 1,8666 dm³ CO₂(g)
---	---

$$n_C = n_{CO_2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{V_{CO_2}}{V_m}; V_{CO_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4 \cdot 1}{12} = 1,8666 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2(g);$$

$2C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1 g C(s) vznikne 1,8666 dm³ CO(g)
---	---

$$\frac{n_C}{2} = \frac{n_{CO}}{2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{m_{CO}}{M_{CO}} = \frac{V_{CO}}{V_m}; V_{CO} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4 \cdot 1}{12} = 1,8666 \text{ dm}^3 \text{ CO}(g);$$

$C(s) + CO_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1 g C(s) vznikne 3,73 dm³ CO(g)
---	---

$$n_C = \frac{n_{CO}}{2}; \frac{m_C}{M_C} = \frac{V_{CO}}{2 \cdot V_m}; V_{CO} = \frac{2 \cdot V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{44,8 \cdot 1}{12} = 3,73 \text{ dm}^3 \text{ CO}(g);$$

$C(s) + H_2O(g) \longleftrightarrow CO(g) + H_2(g)$	Z 1g C(s) vznikne 3,73 dm³ směsi plynů CO(g) a H₂(g).
---	--

$$n_C = \frac{V_{CO}}{V_m}; n_C = \frac{V_{H_2}}{V_m}; V_{CO} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ CO}(g);$$

$$V_{H_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(g);$$

$$V_{celk.} = V_{CO} + V_{H_2} = 1,866 + 1,866 = 3,732 \text{ dm}^3 \text{ směsi plynů CO(g) a H}_2(g).$$

$C(s) + 2H_2O(g) \longleftrightarrow CO_2(g) + 2H_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 5,598 dm³ směsi plynů CO₂(g) a H₂(g).
---	---

$$n_C = \frac{V_{CO_2}}{V_m}; n_C = \frac{V_{H_2}}{V_m}; V_{CO_2} = \frac{V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2(g);$$

$$V_{H_2} = \frac{2 \cdot V_m \cdot m_C}{M_C} = \frac{44,8}{12} = 3,73 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(g);$$

Teoretické výpočty objemu uvolňovaných plynů

Příloha č. 4

$$V_{celk.} = V_{CO_2} + V_{H_2} = 1,866 + 3,73 = 5,598 \text{ dm}^3 \text{ směsi plynů } CO_2(g) \text{ a } H_2(g).$$

Fe (s) + CO₂ (g) $\longleftrightarrow$ FeO (s) + CO (g)	z 1g Fe(s) vznikne 0,4 dm³ CO(g)
--	--

$$n_{Fe} = n_{CO}; V_{CO} = \frac{V_m}{M_{Fe}} = \frac{22,4}{55,847} = 0,4 \text{ dm}^3 \text{ CO(g)};$$

3Fe (s) + 4H₂ O (g) $\longleftrightarrow$ Fe₃ O₄ (s) + 4H₂(g)	z 1g Fe(s) vznikne 0,534 dm³ H₂(g)
---	---

$$\frac{n_{Fe}}{3} = \frac{n_{H_2}}{4}; V_{H_2} = \frac{\frac{4 \cdot V_m}{3}}{M_{Fe}} = \frac{29,86}{55,847} = 0,534 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(g);$$

FeO (s) + C (s) $\longleftrightarrow$ Fe (s) + CO (g)	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm³ CO(g)
---	---

$$n_C = \frac{V_{CO}}{V_m}; V_{CO} = \frac{V_m}{M_C} = \frac{22,4}{12} = 1,866 \text{ dm}^3 \text{ CO(g)};$$

CH₄ (g) $\longleftrightarrow$ C (s) + 2H₂ (g)	z 1 dm³ CH₄(g) vznikne 2 dm³ H₂(g)
---	---

$$n_{CH_4} = \frac{n_{H_2}}{2}; V_{H_2} = \frac{2 \cdot V_{CH_4} \cdot V_m}{V_m} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,4} = 2 \text{ dm}^3 \text{ H}_2(g);$$

CaCO₃ (s) $\longleftrightarrow$ CaO (s) + CO₂ (g)	z 1g CaCO₃(s) vznikne 0,224dm³ CO₂(g)
---	---

$$n_{CaCO_3} = n_{CO_2}; \frac{n_{CaCO_3}}{M_{CaCO_3}} = \frac{V_{CO_2}}{V_m}; V_{CO_2} = \frac{V_m \cdot m_{CaCO_3}}{M_{CaCO_3}} = \frac{22,4 \cdot 1}{100,088} = 0,224 \text{ dm}^3 \text{ CO}_2(g);$$

Termodynamické hodnoty některých prvků a sloučenin

Příloha č. 5

Prvek, sloučenina	Atomová, molekulová hmotnost [1]	Tepelné kapacity $cp = a + b.T + c.T^{-2}$ [J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]				Slučovací entalpie (ΔH^0_{298}) _{sl} [J.mol ⁻¹]	Standardní entropie (ΔS^0_{298}) _{sl} [J.mol ⁻¹ . K ⁻¹]
		a	b . 10 ³	c . 10 ⁻⁵	Rozmezí platnosti teplot [K]		
C(s, grafit)	12,01	17,16	4,27	-8,79	298-2300	0	5,73
CH ₄ (g)	16,03	23,25	47,89	-1,93	298-1500	-78890	184,39
CO(g)	28,01	32,99	4,08	-0,46	298-2500	-110550	197,49
CO ₂ (g)	44,01	44,16	10,50	-8,53	298-2500	-393690	213,74
CaCO ₃ (s)	100,19	104,57	21,94	-25,95	298-1200	-1206400	92,93
Fe(s, α)	55,85	19,26	21,01	-	273-1033	0	27,17
FeO(s)	69,04	52,83	6,24	-3,18	298-Ttá	-264550	58,83
Fe ₃ O ₄ (s, α)	231,34	167,1	78,95	-41,9	298-900	-1116800	151,53
H ₂ (g)	2,01	27,29	3,26	0,5	298-3000	0	130,57
H ₂ O (g)	-	30,01	10,72	0,33	298-2500	-241870	188,83
O ₂ (g)	32	29,97	4,19	-1,67	298-3000	0	205,2

Výpočty změny Gibbsovy energie chemických reakcí uvolňování plynů z formovacích a jadrových směsí

1. Chemická rovnice $C(s) + O_2 \rightarrow CO_2(g)$

Údaje z termodynamických tabulek

$$C: \Delta H_{298} = 0 [J.mol^{-1}]; \Delta S_{298} = 5,73 [J.mol^{-1}.K^{-1}];$$

$$O_2(g): \Delta H_{298} = 0 [J.mol^{-1}]; \Delta S_{298} = 205,2 [J.mol^{-1}.K^{-1}];$$

$$CO_2(g): \Delta H_{298} = -393690 [J.mol^{-1}]; \Delta S_{298} = 213,74 [J.mol^{-1}.K^{-1}];$$

$$C: C_p = 17,16 + 4,27 \cdot 10^{-3}T - 8,79 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 2300 \text{ K}]$$

$$O_2: C_p = 29,97 + 4,19 \cdot 10^{-3}T - 1,67 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 3000 \text{ K}]$$

$$CO_2: C_p = 44,16 + 10,5 \cdot 10^{-3}T - 8,53 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 2500 \text{ K}]$$

Výpočet změny molární tepelné kapacity reakce

$$\Delta a = 44,16 - (17,16 + 29,97) = -2,97$$

$$\Delta b = 10,5 - (4,27 + 4,19) = 2,04$$

$$\Delta c = -8,53 - (-8,79 - 1,67) = 1,93$$

$$\Delta C_p = -2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2$$

Výpočty s použitím ΔC_p lze provést pro teplotní interval [258 až 2300 K]

Výpočet reakčního tepla a entropie v průběhu reakce za standardních podmínek

$$\Delta H_{298} = -393690 - (0) = -393690 [J.mol^{-1}];$$

$$\Delta S_{298} = 213,74 - (205,2 + 5,73) = 2,81 [J.mol^{-1}.K^{-1}];$$

Výpočet entalpie reakce pro teploty

$$800^\circ C: \Delta H_{1073,16} = -393690 +$$

$$\int_{298}^{1073,16} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2) dT = -394440 [J]$$

$$1000^\circ C: \Delta H_{1273,16} = -393690 +$$

$$\int_{298}^{1273,16} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2) dT = -394527 [J]$$

$$1200^\circ C: \Delta H_{1473,16} = -393690 + \int_{298}^{1473,16} (-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2) dT = -394541 [J]$$

Výpočet entropie reakce pro teploty

$$800^\circ C: \Delta S_{1073,16} = 2,81 + \int_{298}^{1073,16} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 1,58883 [J.K^{-1}]$$

$$1000^\circ C: \Delta S_{1273,16} = 2,81 + \int_{298}^{1273,16} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 1,51353 [J.K^{-1}]$$

$$1200^\circ C: \Delta S_{1473,16} = 2,81 + \int_{298}^{1473,16} \left(\frac{-2,97 + 2,04 \cdot 10^{-3}T + 1,93 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 1,50325 [J.K^{-1}]$$

Vypočítané hodnoty změny Gibbsovy energie reakce pro teploty 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

$$\Delta G_{800^\circ C} = -394440 - 1073,16(1,58883) = -396145 [J]$$

Výpočty změny Gibbsovy energie chemických reakcí uvolňování plynů z formovacích a jadrových směsí

$$\Delta G_{1000^\circ\text{C}} = -394527 - 1273,16 \cdot (1,51353) = -396454 \text{ [J]}$$

$$\Delta G_{1200^\circ\text{C}} = -394541 - 1473,16 \cdot (1,50325) = -396756 \text{ [J]}$$

4. Chemická rovnice $\text{C (s)} + \text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow \text{CO (g)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$

Údaje z termodynamických tabulek

$$\text{C(s)} : \Delta H_{298} = 0 \text{ J.mol}^{-1}; \Delta S_{298} = 5,73 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{H}_2\text{O(g)} : \Delta H_{298} = -241870 \text{ J.mol}^{-1}; \Delta S_{298} = 188,83 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{H}_2\text{(g)} : \Delta H_{298} = 0 \text{ J.mol}^{-1}; \Delta S_{298} = 130,57 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{CO(g)} : \Delta H_{298} = -110550 \text{ J.mol}^{-1}; \Delta S_{298} = 197,49 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{C} : C_p = 17,16 + 4,27 \cdot 10^{-3}T - 8,79 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot [298 až 2300 K]}$$

$$\text{H}_2\text{O} : C_p = 30,01 + 10,72 \cdot 10^{-3}T + 0,33 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot [298 až 3000]}$$

$$\text{CO} : C_p = 32,99 + 4,08 \cdot 10^{-3}T - 0,46 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot [298 až 2500 K]}$$

$$\text{H}_2 : C_p = 27,29 + 3,26 \cdot 10^{-3}T + 0,5 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ pro interval teplot [298 až 3000 K]}$$

Výpočet změny molární kapacity reakce

$$\Delta a = (32,99 + 27,29) - (17,16 + 30,01) = 13,11$$

$$\Delta b = (4,08 + 3,26) - (4,27 + 10,72) = -7,65$$

$$\Delta c = (-0,46 + 0,5) - (-8,79 + 0,33) = 8,5$$

$$\Delta C_p = 13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2$$

Výpočty s použitím ΔC_p lze provést pro teplotní interval [298 až 2300 K]

Výpočet změny reakčního tepla a změny entalpie reakce při standardních podmínkách

$$\Delta H_{298} = ((-110550) + 0) - (0 + (-241870)) = 131\,320 \text{ [J]}$$

$$\Delta S_{298} = (197,49 + 130,57) - (5,73 + 188,83) = 133,5 \text{ [J.K}^{-1}\text{]}$$

Výpočet změny entalpie reakce pro teploty

$$800^\circ\text{C} : \Delta H_{1073,16} = 131320 + \int_{298}^{1073,16} (13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2) dT = 139477 \text{ [J]}$$

$$1000^\circ\text{C} : \Delta H_{1273,16} = 131320 + \int_{298}^{1273,16} (13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2) dT = 140429 \text{ [J]}$$

$$1200^\circ\text{C} : \Delta H_{1473,16} = 131320 + \int_{298}^{1473,16} (13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2) dT = 141040 \text{ [J]}$$

Výpočet změny entropie reakce pro teploty

$$800^\circ\text{C} : \Delta S_{1073,16} = 133,5 + \int_{298}^{1073,16} \left(\frac{13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 148,784 \text{ [J.K}^{-1}\text{]}$$

$$1000^\circ\text{C} : \Delta S_{1273,16} = 133,5 + \int_{298}^{1273,16} \left(\frac{13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 149,602 \text{ [J.K}^{-1}\text{]}$$

$$1200^\circ\text{C} : \Delta S_{1473,16} = 133,5 + \int_{298}^{1473,16} \left(\frac{13,11 - 7,65 \cdot 10^{-3}T + 8,5 \cdot 10^{-5}T^2}{T} \right) dT = 150,051 \text{ [J.K}^{-1}\text{]}$$

Výpočet změny Gibbsovy energie reakce pro teplotu 800, 1000 a 1200 °C

$$\Delta G_{800^\circ\text{C}} = 139477 - 1073,16 \cdot (148,784) = -20192 \text{ [J]}$$

Výpočty změny Gibbsovy energie chemických reakcí uvolňování plynů z formovacích a jadrových směsí

$$\Delta G_{1000^\circ\text{C}} = 140429 - 1273,16 \cdot (149,602) = -50038,3 [\text{J}]$$

$$\Delta G_{1200^\circ\text{C}} = 141040 - 1473,16 \cdot (150,051) = -80009,1 [\text{J}]$$

10. Chemická rovnice $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightarrow \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$

Údaje z termodynamických tabulek

$$\text{CaCO}_3(\text{s}): \Delta H_{298} = -1206400 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]; \Delta S_{298} = 92,93 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{CO}_2(\text{g}): \Delta H_{298} = -393690 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]; \Delta S_{298} = 213,74 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{CaO}(\text{s}): \Delta H_{298} = -635440 \text{ J/mol} \quad \Delta S_{298} = 39,77 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{CaCO}_3: C_p = 104,57 + 21,94 \cdot 10^{-3} T - 25,95 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 1200 \text{ K}]$$

$$\text{CO}_2: C_p = 44,16 + 10,5 \cdot 10^{-3} T - 8,53 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 2500 \text{ K}]$$

$$\text{CaO}: C_p = 49,65 + 4,52 \cdot 10^{-3} T - 6,95 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \text{ pro interval teplot } [298 \text{ až } 1800 \text{ K}]$$

Výpočet změny molární tepelné kapacity reakce

$$\Delta a = (49,65 + 44,16) - 104,57 = -10,76$$

$$\Delta b = (4,52 + 10,5) - 21,94 = -6,92$$

$$\Delta c = (-6,95 - 8,53) - (-25,95) = 10,47$$

$$\Delta C_p = -10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

Výpočty s použitím ΔC_p lze provést pro teplotní interval [298 až 1200 K]

Vzhledem k tomu že interval použitelnosti koeficientů pro tuto rovnici je pouze do maximální teploty 1200 K, je nutno uvést že výpočty provedené nad tuto teplotu mají pouze informativní a porovnávací charakter.

Výpočet změny reálného tepla a změny entropie reakce při standardních podmínkách

$$\Delta H_{298} = (-635440 - 393690) - (-1206400) = 177270 [\text{J}]$$

$$\Delta S_{298} = (39,77 + 213,74) - (92,93) = 160,58 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Výpočet změny entalpie reakce pro teploty

$$800^\circ\text{C}: \Delta H_{1073,16} = 177270 + \int_{298}^{1073,16} (-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) dT = 167790 [\text{J}]$$

$$1000^\circ\text{C}: \Delta H_{1273,16} = 177270 + \int_{298}^{1273,16} (-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) dT = 164167 [\text{J}]$$

$$1200^\circ\text{C} - \Delta H_{1473,16} = 177270 + \int_{298}^{1473,16} (-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) dT = 160226 [\text{J}]$$

Výpočet změny entropie reakce pro teploty

$$800^\circ\text{C}: \Delta S_{1073,16} = 160,58 + \int_{298}^{1073,16} \left(\frac{-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2}{T} \right) dT = 146,87 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$1000^\circ\text{C}: \Delta S_{1273,16} = 160,58 + \int_{298}^{1273,16} \left(\frac{-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2}{T} \right) dT = 143,779 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$1200^\circ\text{C}: \Delta S_{1473,16} = 160,58 + \int_{298}^{1473,16} \left(\frac{-10,76 - 6,92 \cdot 10^{-3} \cdot T + 10,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2}{T} \right) dT = 140,906 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Výpočty změny Gibbsovy energie chemických reakcí uvolňování plynů z formovacích a jádrových směsí

Změna změny Gibbsovy energie reakce

$$\Delta G_{800^\circ\text{C}} = 176790 - 1073,16 \cdot (146,87) = 10175 \text{ [J]}$$

$$\Delta G_{1000^\circ\text{C}} = 164167 - 1273,16 \cdot (143,779) = -18886,7 \text{ [J]}$$

$$\Delta G_{1200^\circ\text{C}} = 160226 - 1473,16 \cdot (140,906) = -47351,1 \text{ [J]}$$

Výpočet změny Gibbsovy energie pro reakci $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightarrow \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$ pomocí energetických konstant

Výpočet změny Gibbsovy energie byl proveden na základě vztahu:

$$\Delta G_T^O = A + B \cdot T \cdot \log T + C \cdot T, \text{ [J]} \quad (1)$$

kde značí: A, B, C – experimentálně stanové konstanty;
T – teplotu [K].

Konstanty použité pro výše uvedenou rovnici

$A = 167383 \text{ [J]}$; $B = 0$; $C = -141,50 \text{ [J]}$, konstanty platí pro interval teplot 298 až 1200 [K], dosazením konstant do rovnice (1) lze zapsat obecnou rovnici pro výpočet změny Gibbsovy pro tepelný rozklad CaCO_3 :

$$\Delta G_T^O = 167383 - 141,5 \cdot T \text{ [J]}$$

(2)

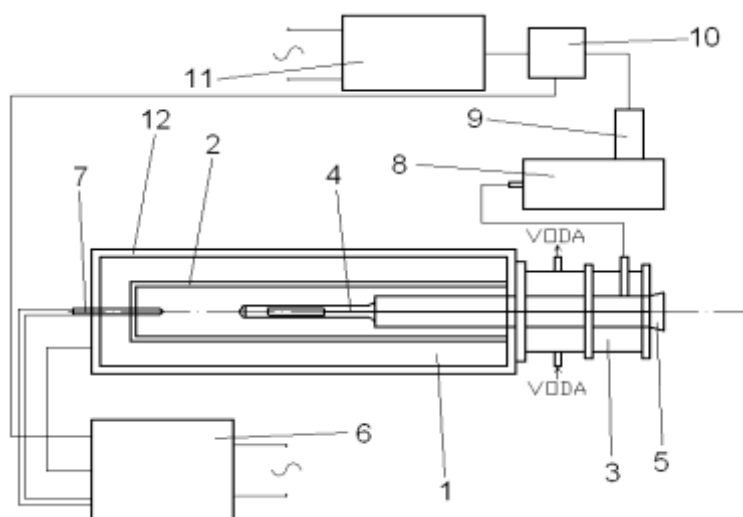
Výpočet změny Gibbsovy energie reakce pro teploty 298 až 1200 K

$$500 \text{ [K]}: \Delta G_{500}^O = 167383 + 0 - 141,50 \cdot 500 = 96633 \text{ [J]}$$

$$1073 \text{ [K]}: \Delta G_{1073}^O = 167383 + 0 - 141,50 \cdot 1073 = 15554 \text{ [J]}$$

$$1200 \text{ [K]}: \Delta G_{1200}^O = 167383 + 0 - 141,50 \cdot 1200 = -2417 \text{ [J]}$$

Výpočet teploty rozkladu, tj. ; $\Delta G_T^O = 0$, lze psát: $0 = 167383 + 141,5 \cdot T$; $T = 1183 \text{ [K]}$,
tj. $910 \text{ }^\circ\text{C}$.



- 1 - těleso odporové trubkové pece; 2 - keramická trubice s vyhřívacími odporovými elementy; 3 - vodou chlazená uzavírací hlavice; 4 - zatavená křemenná trubice s lodičkou z molybdenového plechu; 5 - kónický uzávěr vyhřívacího prostoru; 6 - regulátor ohřevu pece; 7 - teplotní čidlo pece; 8 - stabilizační válcová nádoba; 9 - tlakové čidlo PXM02MC-160mBARG5T; 10 - sběrnice s A/D převodníkem; 11 - počítač s monitorem; 12 - plechový plášť pece

Zjištěné kalibrační konstanty pro dané tlaky pomocí zátěžové pumpy AMETEK

Tlaky zátěžové pumpy [Pa]	Hodnoty změřených napětí [V]	Přepočtené konstanty [Pa.V ⁻¹]
1000	1,74300	0,00030300
6000	3,31800	0,00031200
8000	3,94600	0,00031400
10000	4,57200	0,00031300
Průměrná konstanta:		0,0003125

Výpočet objemu plynů při zkoušce plynatvornosti – zpracování naměřených dat

Měřený výsledný objem uvolněných plynů při zkoušce plynatvornosti směsi pomocí měřicího zařízení lze vypočítat na základě izotermických podmínek ($T = \text{konst.}$) ze vztahu:

$$p \cdot v = \text{konst.} \quad (1)$$

Pro podmínky měřicího zařízení je možno vztah (1) upravit do následujícího tvaru

$$\Delta V \cdot p_A = \Delta p \cdot V_0, \quad (2)$$

kde značí: ΔV – změnu objemu uvolněných plynů ze směsi; Δp – změnu tlaku; uvolněných plynů ze směsi; V_0 – objem měřicí soustavy ($V_0 = 1995 \text{ cm}^3$); p_A – atmosferický tlak Liberec ($97 \cdot 10^3 \text{ Pa}$).

Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 8

Číslo směsi	Označení vzorku	Výrobce nebo zdroj	Charakter pojiva	Střední velikost ostříva d50 [mm]	Konzistence	Ztráta žháním	Vlhkost [%]	Pevnost v tahu za tepla [MPa]	Teploty v peci [°C] při měření plynotvornosti šokem	Poznámka
1.	15731	Hüttenes –Albertus	výrobce neudává	0,28	sypká komplexní směs	2,52	0,12	1,9	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
2.	15947	Hüttenes –Albertus	výrobce neudává	0,24	sypká komplexní směs	3,8 *) 4,2**);	0,18	2,7	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
3.	20020	Hüttenes –Albertus	výrobce neudává	0,21	sypká komplexní směs	2,56	0,12	1,8	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
4.	15970	Hüttenes –Albertus	výrobce neudává	0,27	sypká komplexní směs	2,0	0,09	1,2	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
5.	15994	Hüttenes –Albertus	výrobce neudává	0,30	sypká komplexní směs	2,47*) 2,4**);	0,1	1,56	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
6.	TPR 210 F	Sand team	výrobce neudává	0,25	sypká komplexní směs	3,05	0,13	1,77	800/1000/1200	měření směsi i jednotlivých frakcí
7.	CT – Ostašov	Ostašovská slévárna Ferex Castings Liberec	vodní sklo	0,19	jádrová komplexní směs	-	-	-	800/1000/1200	
8.	Směs na bázi Novanolu	Ostašovská slévárna Ferex Castings Liberec	pryskyřice	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
9.	Cold Box	Ostašovská slévárna Ferex Castings Liberec	pryskyřice	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
10.	Hot Box	Ostašovská slévárna Ferex Castings Liberec	pryskyřice	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
11.	Směs na bázi Dorsilu V	Ostašovská slévárna Ferex Castings Liberec	vodní sklo 3,5 % Dorsil	0,27 střeleč ST 53	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
12.	ST52 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,32	vytvrzená jádra	0,23	0,2	-	800/1000/1200	
13.	ST53 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,27	vytvrzená jádra	0,23	0,2	-	800/1000/1200	
14.	ST54 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,22	vytvrzená jádra	0,23	0,2	-	800/1000/1200	
15.	ST55 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,17	vytvrzená jádra	0,23	0,2	-	800/1000/1200	

Přehled slévarenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 8

16.	ST56 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,15	vytvrzená jádra	0,23	0,2	-	800/1000/1200	
17.	Směs na bázi Ecolotec	vyráběno v dílně KSP TUL	2 % Ecolotec	0,27 střeš ST 53	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
18.	KR-1	Krkonošské slévárny	1,1% pryskyřice ASKURAN; 0,6% tvrdidlo HERTR RAPID 50, písek ST 53 ELE4	0,27	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	jádro černého kvádru bez nátěru
19.	KR-2	Krkonošské slévárny	1,1% pryskyřice ASKURAN; 0,6% tvrdidlo HERTR RAPID 50, písek ST5 ELE4, nátěr: žáruvzdorné plnivo na bázi grafitu a koksů v ethanolu, obsah ethanolu 34 - 36 %	0,27	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	jádro černého kola s nátěrem
20.	P-1-CB, vstřelovaná směs CB – amin II	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	CB- amin II	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	vstřelovaná směs
21.	P-2-CO	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	ruční směs - CO ₂	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	směs pro ruční formování
22.	P-CB-CO	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	vstřelovaná směs - CO ₂	0,19	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	vstřelovaná směs (CB - CO ₂)
23.	Pc-L1	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	(pryskyřice) ozn. Pc-L1	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	jádrová směs PCL 1
24.	Pc-L2	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	(pryskyřice) ozn. Pc-L2	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	jádrová směs PCL II
25.	Pc-L3	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	(pryskyřice) ozn. Pc-L3	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	jádrová směs PCL III

Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 8

26.	P-2-CB	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	vstřelovaná směs CB – amin I	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	vstřelovaná směs CB – amin I
27.	P-1-C-V	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	bentonit	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	formovací směs výplňová, černé zbarvení
28.	P-2-C	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	bentonit	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	modelová směs – rafinovaná, červené zbarvení
29.	P-II-M	Slévárna uměleckého lití Jablonec n. N.	bentonit	-	vytvrzená jádra	-	-	-	1000	formovací směs modelová surová, červené zbarvení
30.	BZK	Buzuluk Komárov	Písek ST-56, fenolová pryskyřice	0,15	vytvrzená jádra	-	-	-	800/1000/1200	
31.	S-B-K	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá prášková forma (Universální sádra) , doba tuhnutí 8-12 min. $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	-	prášková forma	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: Kittfort, s r.o., Neratovice, ČR
32.	S-B-H	vyráběno v dílně KSP TUL	Het bílá prášková forma, doba tuhnutí 25-45 min. $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	-	prášková forma	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, BPB Formula GmbH, Walkenried, SRN
33.	S-Š-H	vyráběno v dílně KSP TUL	HET šedá prášková $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	-	prášková forma	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, Gypstrend, s r.o., Koběřice, ČR
34.	S-B-K	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Universální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: Kittfort, s r.o., Neratovice, ČR

Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 8

35.	S-B-H	vyráběno v dílně KSP TUL	Het bílá , 50% vody a 50% sádry, doba tuhnutí 25-45 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, BPB Formula Gmbh, Walkenried, SRN
36.	S-Š-H	vyráběno v dílně KSP TUL	HET šedá , 50% vody a 50% sádry CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, Gypstrend, s r.o., Koběřice, ČR
37.	S-B-K	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 25% vody a 75% sádry, (Universální sádra) doba tuhnutí 8-12 min., CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: Kittfort, s r.o., Neratovice, ČR
38.	S-B-H	vyráběno v dílně KSP TUL	Het bílá, 25% vody a 75% sádry, doba tuhnutí 25-45 min., CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, BPB Formula Gmbh, Walkenried, SRN
39.	S-Š-H	vyráběno v dílně KSP TUL	HET šedá , 25% vody a 75% sádry, CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, Gypstrend, s r.o., Koběřice, ČR
40.	MBK-4	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Universální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	1000	vzorek měřen po 4 h od přípravy

Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynatvornosti

Příloha č. 8

41.	MBK-18	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Univerzální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	1000	vzorek měřen po 18 h od přípravy
42.	MBK-24	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Univerzální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	1000	vzorek měřen po 24 h od přípravy
43.	MBK-200	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Univerzální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	1000	sušeno 200°C
44.	MBK-400	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a - 50% sádry (Univerzální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ Oš	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	1000	sušeno 400°C
45.	JBS - MJ	vyráběno v dílně KSP TUL	směsný bentonit typ KERIBENT C30 a směsný koncentrát SABENIL K, osttřivo Střeleč		Sypká komplexní směs	-	-	-	800/1000/1200	

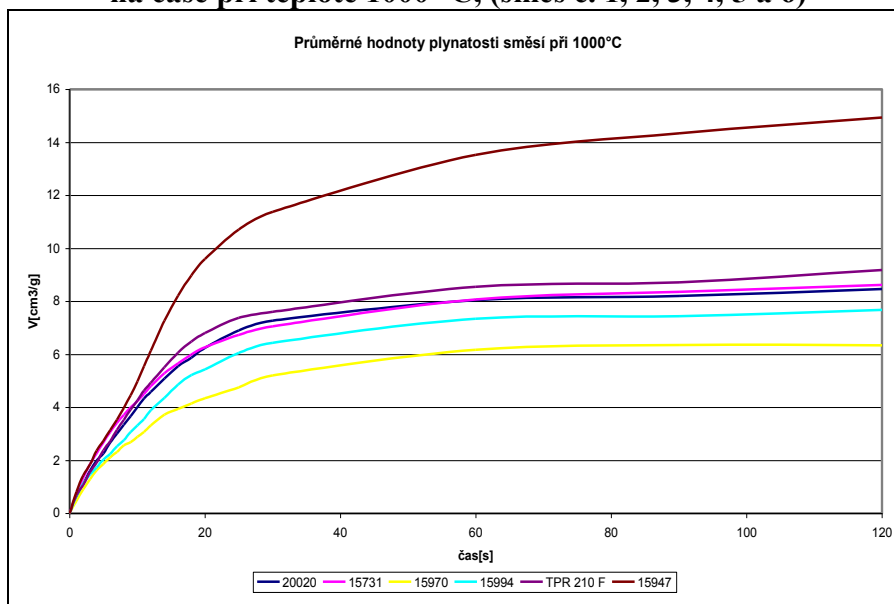
Přehled slévárenských materiálů u kterých bylo realizováno měření plynotvornosti

Příloha č. 8

46.	Jádro Cold Box	vyráběno v dílně KSP TUL	Ostřivo PR-33 pryskyřice ASCOCURE 388, aktivátor ASCOCURE 688.		Vytvrzené vzorky	-	-	-	800/1000/1200	
47.	JBS – SG-1	vyráběno v dílně KSP TUL	Komplexní směs s pojivem bentonit typ KERIBENT C30		Sypká komplexní směs	-	-	-	1200	
48.	JBS – SG-2	vyráběno v dílně KSP TUL	Komplexní směs s pojivem bentonit typ CB		Sypká komplexní směs	-	-	-	1200	
49.	JBS – SG-3	vyráběno v dílně KSP TUL	Komplexní směs s pojivem bentonit typ Ekosil 03B78		Sypká komplexní směs	-	-	-	1200	
50.	Bentonit C30	Bentonit bez ostřiva C30	C30		Bez ostřiva	-	-	-	1200	
51.	Bentonit CB	Bentonit bez ostřiva CB	CB		Bez ostřiva	-	-	-	1200	
52.	Bentonit Ekosil	Bentonit bez ostřiva Ekosil	Ekosil		Bez ostřiva	-	-	-	1200	
53.	JBS - BK	Buzuluk - Komárov	Komplexní směs s pojivem bentonit typ Sabenil + Sabenil K		Sypká komplexní směs	-	-	-	Využita pro simulace v této práci	

Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

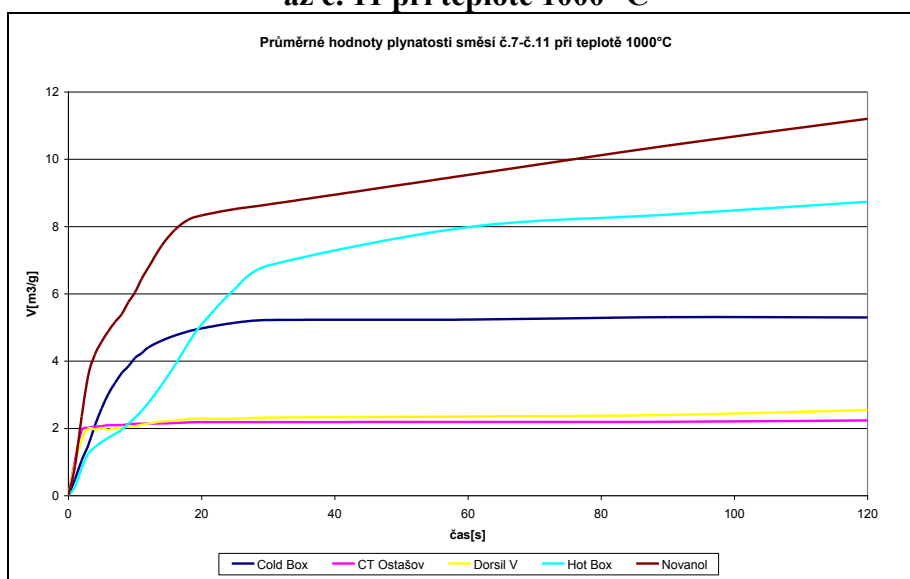
Grafická závislost průměrných hodnot plynotvornosti sypkých komplexních směsí na čase při teplotě 1000 °C, (směs č. 1, 2, 3, 4, 5 a 6)



Průměrné hodnoty plynotvornosti v závislosti na čase sypkých komplexních směsí č. 1, 2, 3, 4, 5, 6 při teplotě 1000 °C

Čas [s]	Hodnoty plynotvornosti [cm ³ .g ⁻¹]					
	Označení směsi					
	č. 1 (15731)	č. 2 (15947)	č. 3 (20020)	č. 4 (15970)	č. 5 (15994)	č. 6 (TPR 210 F)
20	6,266	9,603	6,241	4,34	5,438	6,806
30	7,062	11,384	7,267	5,211	6,441	7,601
90	8,363	14,342	8,205	6,348	7,439	8,714
120	8,625	14,942	8,469	6,348	7,675	9,183

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti již hotových jader ze směsí č.7 až č. 11 při teplotě 1000 °C

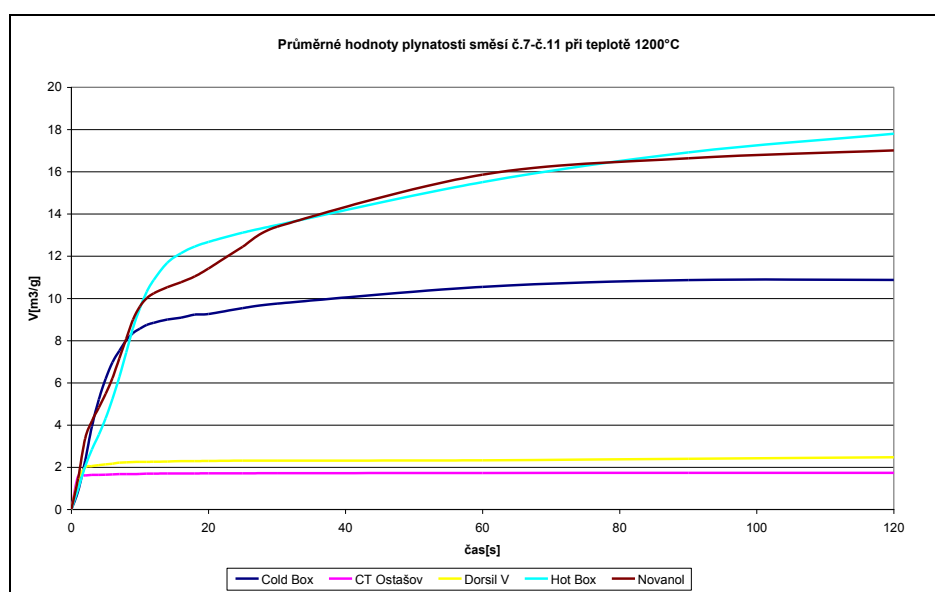


Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

Průměrné hodnoty plynotvornosti již hotových jader ze směsí č. 7 až č. 11 při teplotě 1000 °C

Čas[s]	Hodnoty plynotvornosti [cm ³ .g ⁻¹]				
	Označení směsi				
	č. 7 (CT Ostašov)	č. 8 (Novanol)	č. 9 (Cold Box)	č. 10 (Hot Box)	č. 11 (Dorsil V)
20	2,186	8,332	4,974	5,088	2,285
30	2,187	8,653	5,221	6,838	2,321
90	2,194	10,405	5,305	8,352	2,401
120	2,237	11,204	5,299	8,736	2,547

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti již hotových jader ze směsí č. 7 až č. 11 při teplotě 1200 °C

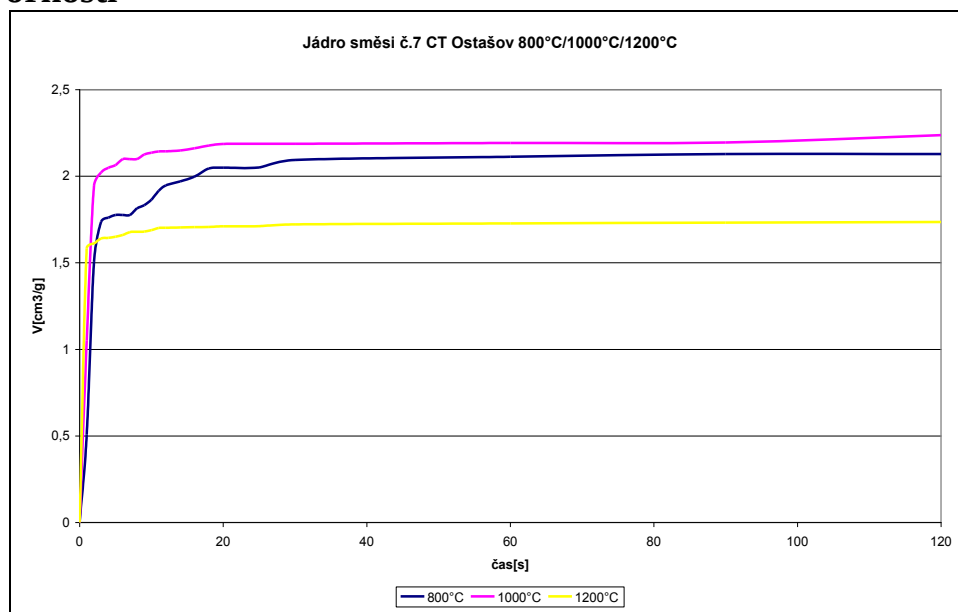


Průměrné hodnoty plynotvornosti již hotových jader ze směsí č. 7 až č. 11 při teplotě 1200 °C

Čas[s]	Hodnoty plynotvornosti [cm ³ .g ⁻¹]				
	Označení směsi				
	č. 7 (CT Ostašov)	č. 8 (Novanol)	č. 9 (Cold Box)	č. 10 (Hot Box)	č. 11 (Dorsil V)
20	1,710	11,415	9,266	12,673	2,299
30	1,721	13,397	9,754	13,478	2,315
90	1,732	16,639	10,870	16,914	2,399
120	1,735	17,009	10,875	17,806	2,477

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti vzorků hotových jader ze směsí č.7 (CT Ostašov) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

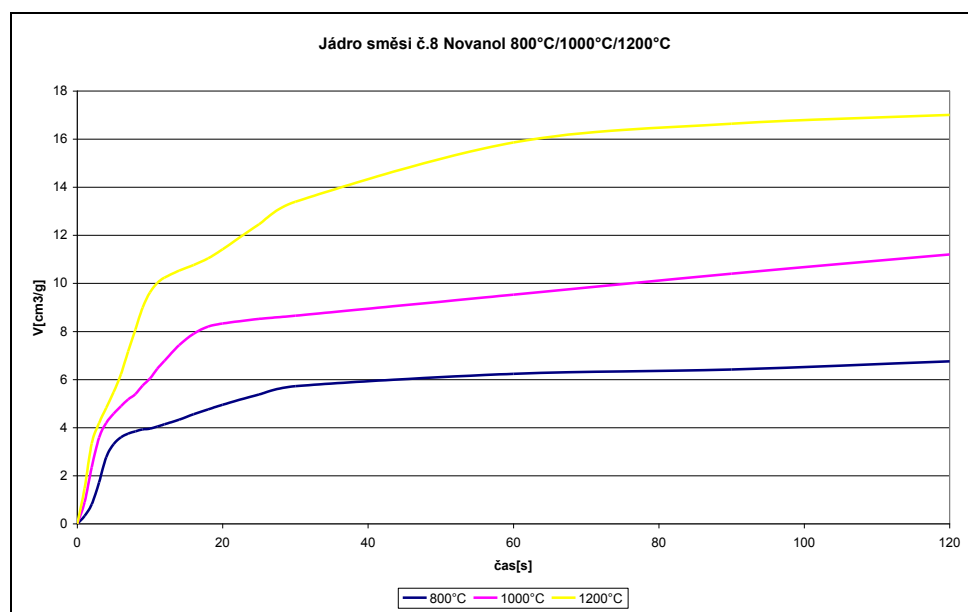
Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti



Průměrné hodnoty plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 7 (CT Ostašov) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Hodnoty plynotvornosti [cm ³ .g ⁻¹] směsi č.7 CT Ostašov			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
20	2,049	2,186	1,710
30	2,093	2,187	1,721
60	2,111	2,191	1,727
90	2,128	2,194	1,732
120	2,128	2,237	1,735

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti vzorků jader ze směsi č.8 (Novanol) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

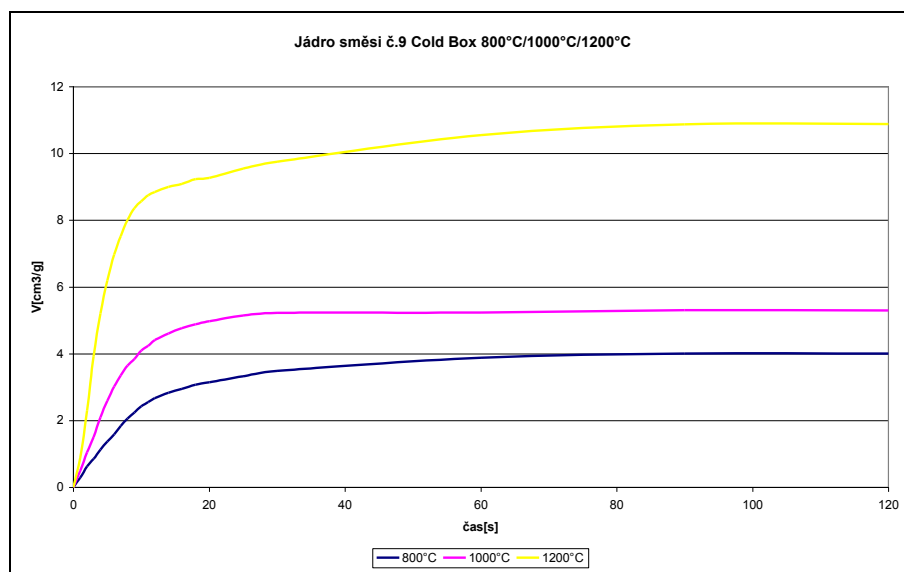


Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

Průměrné hodnoty plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 8 (Novanol) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Hodnoty plynotvornosti [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] směsi č. 8 Novanol			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
30	5,726	8,653	13,397
60	6,238	9,532	15,861
90	6,416	10,405	16,639
120	6,757	11,204	17,009

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 9 (Cold Box) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

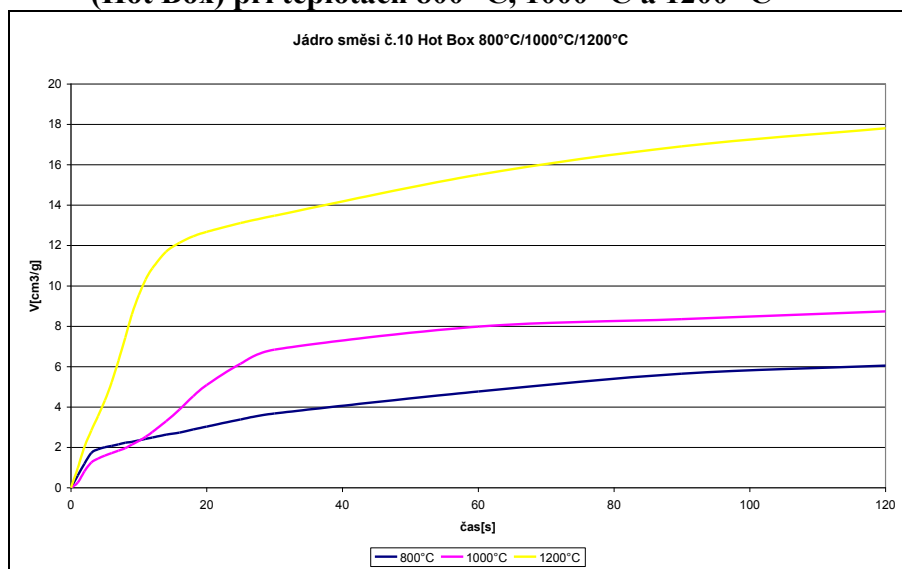


Průměrné hodnoty plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 9 (Cold Box) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Hodnoty plynotvornosti [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] směsi č.9 Cold Box			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
60	3,877	5,233	10,546
90	4,006	5,305	10,870
120	4,008	5,299	10,875

Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

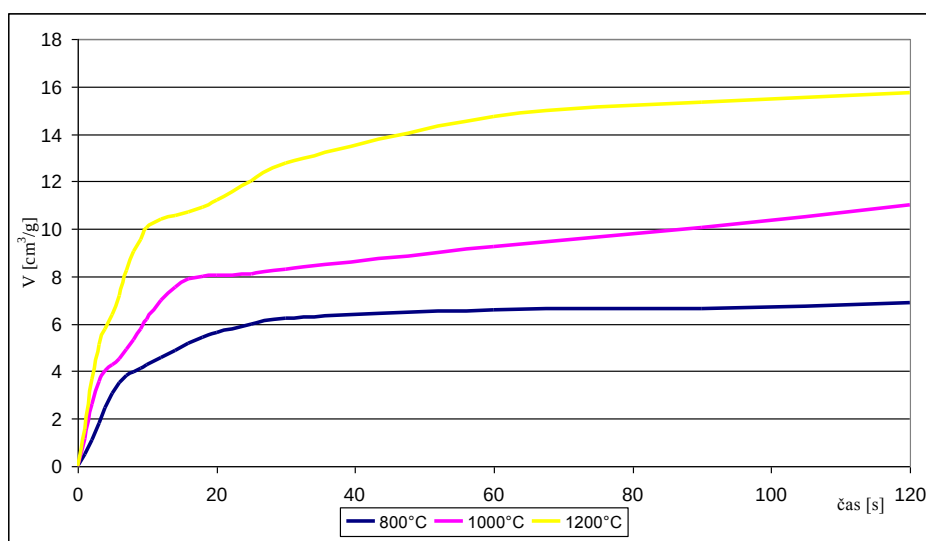
Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 10 (Hot Box) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C



Průměrné hodnoty plynotvornosti vzorků jader ze směsi č. 10 (Hot Box) při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Čas[s]	Hodnoty plynotvornosti [cm ³ .g ⁻¹] směsi č. 10 Hot Box		
	Teplota[°C]		
	800	1000	1200
30	3,683	6,838	13,478
60	4,772	7,981	15,508
90	5,649	8,352	16,914
120	6,048	8,736	17,806

Grafické závislosti průměrných hodnot plynotvornosti směsi č.12 - ST 52 PAP při teplotách 800 °C,1000 °C a 1200 °C



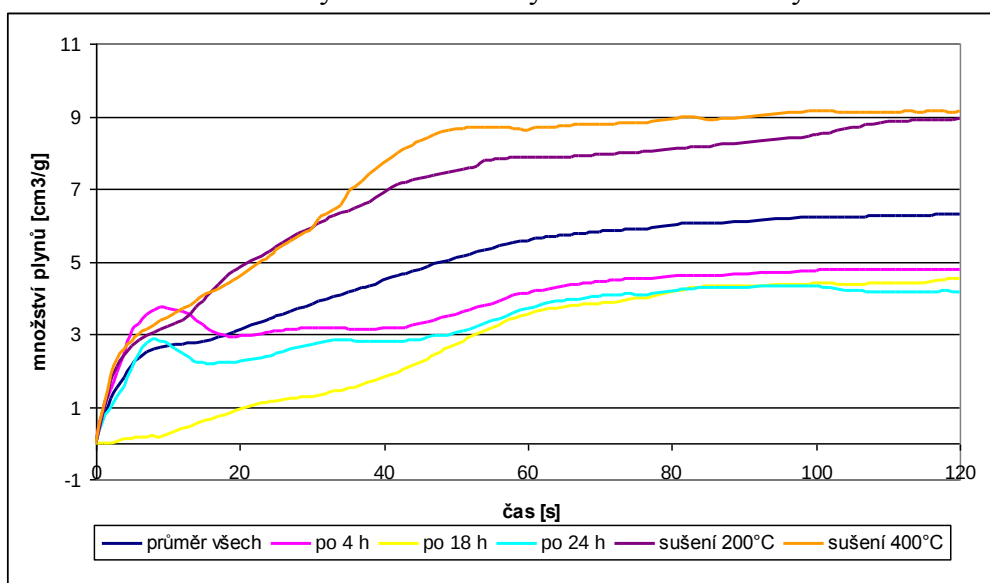
Výběrový přehled realizovaných výsledků experimentů pro měření plynotvornosti

Průměrné hodnoty plynotvornosti směsi č. 12 při teplotách 800 °C, 1000 °C a 1200 °C

Hodnoty plynotvornosti [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] směsi č. 12 ST 52 PAP			
Čas[s]	teplota[°C]		
	800	1000	1200
60	6,56	9,26	14,71
90	6,62	10,05	15,32
120	6,89	10,98	15,72

Vzorky č. 40 až č.44

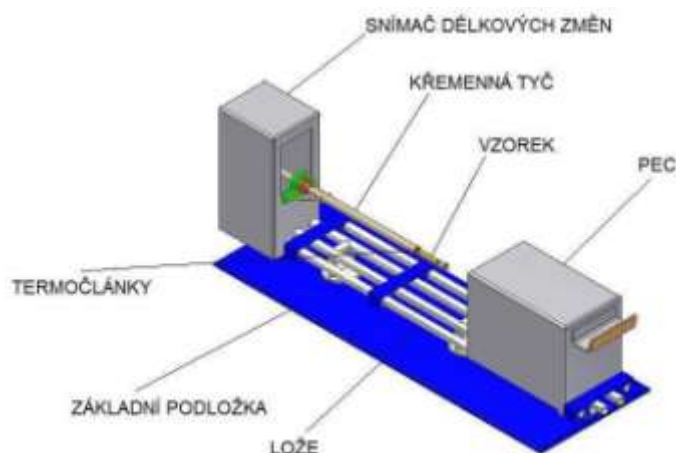
Monoblok sádry Kittfort v různých stádiích stáří a vysušení



Závislost plynotvornosti na čase pro směsi č. 40 až č. 44 při teplotě 1000 °C

Průměrné hodnoty plynotvornosti směsí č. 40 až č. 44 při teplotě 1000 °C

Vybrané hodnoty plynotvornosti směsí [cm^3/g]						
Čas [s]	Vzorek					
	průměr	č. 40 4 h	č. 41 18 h	č. 42 24 h	č. 43 sušení 200°C	č. 44 Sušení 400°C
60	5,57	4,11	3,55	3,71	7,85	8,61
90	6,04	4,60	4,30	4,25	8,18	8,88
120	6,30	4,76	4,53	4,26	8,91	9,12



Schema měřicího zařízení pro sledování dilatací



Forma na výrobu vzorků Ø 8 x 50 mm pro zkoušku měření dilatace a vzorky

Zjištěná změna napětí na indukčním snímači délkových změn odpovídá změně rozměrů sledovaného vzorku a vyjadřuje se pomocí napětí v jednotkách [V]. Princip výpočtu výsledků dilatací v čase během tepelné zátěže je následující:

a) změna napětí ΔU [V] - je vypočítána z rozdílu napětí počátečního nastavení indukčního snímače (počáteční hodnota U_1) a naměřeného napětí indukčního snímače (hodnota U_2):

$$\Delta U = U_1 - U_2, \quad (1)$$

kde značí: ΔU - rozdíl napětí;
 U_1 - hodnotu počáteční;
 U_2 - hodnotu naměřenou.

b) hodnota dilatace δ [μm] - je vypočítána z podílu hodnot napětí indukčního snímače ΔU a kalibrační konstanty indukčního snímače:

$$\delta = \frac{\Delta U}{0,004114} \quad (2)$$

kde značí: δ - změnu délky vzorku, tj. výslednou hodnotu dilatace;
 ΔU - rozdíl napětí indukčního snímače počátečního a naměřeného;
0,004114 - kalibrační konstantu.

c) hodnota dilatace přepočítána na procentuální vyjádření:

$$\% \text{hodnota} = \frac{\delta}{k}, \quad (3)$$

$$k = \frac{100\%}{l_0}, \quad (4)$$

kde značí: % hodnota - změnu délky v procentech;

- δ - změnu délky [μm];
 k - konstantu přepočtu (pro každý vzorek rozdílné);
 l_0 - počáteční délku vzorku (pro každý vzorek rozdílné) [μm]



**Pohled na měřicí zařízení v okamžiku ohřevu vzorku,
vlevo pec, vpravo je zabudovaný indukční snímač**



Pohled na křemennou trubici dilatometru se vzorkem po ohřevu



Pohled na zborcený vzorek při chladnutí volně na vzduchu

Metodika prováděných experimentů tepelným šokem probíhala následovně: nejprve byl zprovozněn PC a příslušný program, který slouží pro zaznamenávání sledovaných veličin, tj. teploty vzorku, teploty okolí vzorku v peci a elektrického napětí. Nastavení je podobné, jako při nastavení programu pro měření plynatvornosti. V programu byl nastaven krok záznamu naměřených dat (časový interval) a soubor, do kterého se data následovně zapisovala. Jedná se o ohřev vzorků tepelným šokem, proto musela být zprovozněna pec, ve které byla nastavena teplota 800 °C nebo 1000 °C. Hodnota teploty v peci byla nastavena pomocí regulátoru teploty.

Výchozí hodnota délky sledovaných vzorků byla měřena před vložením do pece pomocí digitální posuvky (např. posuvka MITUTOYO CD-15). Tyto hodnoty byly vždy zaznamenány do textového souboru prostřednictvím PC. Formát datového výstupu je možné nastavit dle uživatelské potřeby. Pak následovalo vlastní měření dilatace vzorku směsí. Vzorky musí být v kompaktní podobě, oproti měření plynatvornosti, kde to není podmínkou. Vzorek byl uložen do křemenné trubice dilatometru a byla nastavena výchozí poloha snímače dilatace prostřednictvím stavěcího šroubu (vnitřní křemenná tyčinka se musí dotýkat vzorku). Po vložení křemenné trubice se vzorkem do pece následoval přímý ohřev zkušební vzorku, tj. ohřev z teploty pokojové cca 20 °C na teplotu 800 °C nebo 1000 °C. Současně s vložením

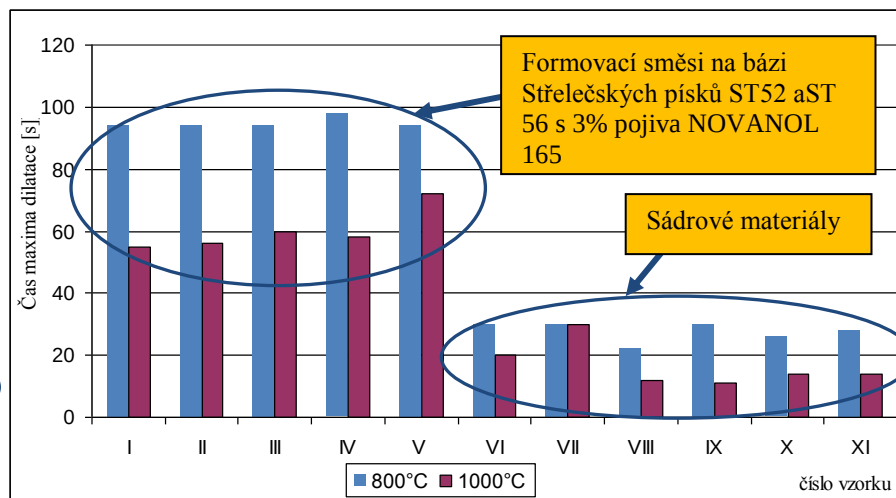
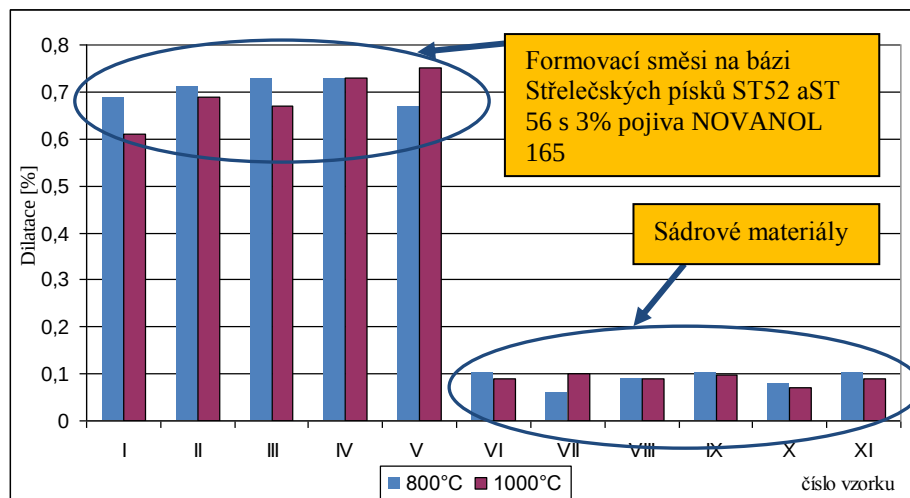
vzorku do pece byl spuštěn program pro zaznamenávání sledovaných a registrovaných hodnot počítačem, a to hodnota dilatace v závislosti na čase, teplota na povrchu ohřívaného vzorku a teplota okolí vzorku. S přibývajícím časem zahřívání vzorku se zvyšovaly i teploty na povrchu vzorku a v jeho okolí. Tyto teploty se liší nepatrně, avšak teplota okolí je vždy o něco vyšší než teplota vzorku. Při měření byl sledován okamžik, kdy se teplota povrchu vzorku rovnala teplotě jeho okolí. Tím byla dosažena potřebná teplota vzorku, která činila 800 °C nebo 1000 °C. Po dosažení této teploty byl vypnut program a následně i pec. Následovalo chladnutí a později i vyjmutí vzorku z pece. Měření tepelným šokem na teplotu 1000 °C probíhalo stejně jako předchozí měření, s tím rozdílem, že na regulátoru pece byla nastavena požadovaná teplota ohřevu.

Metodika měření dilatací postupným ohřevem je podobná jako v předchozím případě, liší se charakterem ohřevu sledovaného vzorku, v tomto případě je vzorek vložen do pece o pokojové teplotě a postupně je ohříván na teplotu 1000 °C. Tyto experimenty jsou časově náročnější, protože se jedná o postupný ohřev vzorku z pokojové teploty a také vychladnutí pece opět na pokojovou teplotu trvá poměrně velmi dlouho, cca 6 hodin i více, ochlazování pece je dlouhé především z důvodu kvalitně izolovaného prostoru pecní vyzdívky. Nastavení přírůstku teploty se nastavuje přímo na regulátoru pece zařízení.

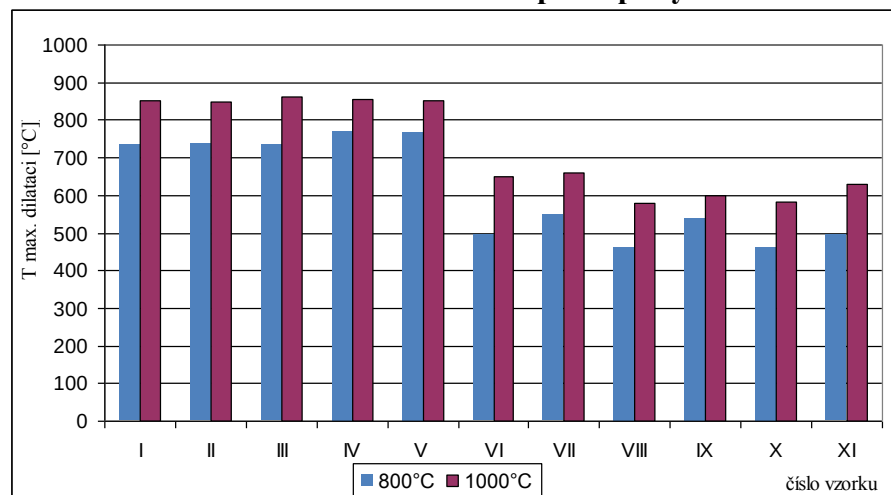
Přehled slévarenských materiálů u kterých bylo realizováno měření dilatace

Příloha č. 11

Číslo směsi	Označení vzorku	Výrobce nebo zdroj	Charakter pojiva	Střední velikost ostřiva d50 [mm]	Konzist.	Ztráta žiháním	Vlhkost [%]	Pevnost v tahu za tepla [MPa]	Proměřené teploty postupným ohřevem [°C/min] Dilatace	Proměřené teploty [°C] šokem–Dilatace	Poznámka
I.	ST52 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,32	ztuhlé vzorky	0,23	0,2	-	1000	800/1000	
II.	ST53 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,27	ztuhlé vzorky	0,23	0,2	-	1000	800/1000	
III.	ST54 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,22	ztuhlé vzorky	0,23	0,2	-	1000	800/1000	
IV.	ST55 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,17	ztuhlé vzorky	0,23	0,2	-	1000	800/1000	
V.	ST56 PAP	vyráběno v dílně KSP TUL	3 % Novanol 165	0,15	ztuhlé vzorky	0,23	0,2	-	1000	800/1000	
VI.	S-B-K	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 50% vody a -50% sádry (Universální sádra) doba tuhnutí 8-12 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: Kittfort, s r.o., Neratovice, ČR
VII.	S-B-H	vyráběno v dílně KSP TUL	Het bílá , 50% vody a 50% sádry, doba tuhnutí 25-45 min. CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, BPB, SRN
VIII.	S-Š-H	vyráběno v dílně KSP TUL	HET šedá , 50% vody a 50% sádry CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, Gypstrend, s r.o.,
IX.	S-B-K	vyráběno v dílně KSP TUL	Kittfort bílá, 25% vody a 75% sádry, (Universální sádra) doba tuhnutí 8-12 min., CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: Kittfort, s r.o., Neratovice,
X.	S-B-H	vyráběno v dílně KSP TUL	Het bílá, 25% vody a 75% sádry, doba tuhnutí 25-45 min., CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, BPB Formula Gmbh, Walkenried, SRN
XI.	S-Š-H	vyráběno v dílně KSP TUL	HET šedá , 25% vody a 75% sádry, CaSO ₄ .2H ₂ O	-	ztuhlé vzorky	-	-	-	-	800/1000	Dodavatel sádry: HET, Gypstrend, s r.o.,



Souhrnný graf procentuálních výsledků maximální dilatace směsí č. I až č. XI pro teploty 800 °C a 1000 °C a Souhrnný graf časů maximálních dilatací směsí č. I až č. XI pro teploty 800 °C a 1000 °C



Souhrnný graf teplot maximálních dilatací směsí č. I až č. XI pro teploty 800 °C a 1000 °C

Výsledky výpočtů změn Gibbsovy energie

Příloha č. 13

Číslo Rovnice	Typ reakce	Množství uvolněných plynů z 1 gramu složky	Změna Gibbsovy energie [J] při teplotách			Mezní teplota [°C] pro průběh děje	Rovnice přímky teplot
			800° C	1000 °C	1200 °C		
1	$C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow CO_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO ₂ (g)	- 396 145	-396 454	-396 756	-258542,72 nereálné v našich podmínkách	y = -1,5275x - 394924
2	$2C(s) + O_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO (g)	-417 886	-455 143	-492 305	-1445,76 nereálné v našich podmínkách	y = -186,05x - 269064
3	$C(s) + CO_2(g) \longleftrightarrow 2CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm ³ CO (g)	-21 696,8	-58 636,2	- 95 491,8	682,307	y = -184,49x + 125879
4	$C(s) + H_2O(g) \longleftrightarrow CO(g) + H_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 3,73 dm ³ směsi plynů CO(g) a H ₂ (g).	-20 192	-50 038,3	- 80 009,1	665,12638	y = -149,54x + 99463
5	$C(s) + 2H_2O(g) \longleftrightarrow CO_2(g) + 2H_2(g)$	z 1g C(s) vznikne 5,598 dm ³ směsi plynů CO ₂ (g) a H ₂ (g).	- 18 644,4	- 41 383,1	- 64 466,1	637,765	y = -114,55x + 73056
6	$Fe(s) + CO_2(g) \longleftrightarrow FeO(s) + CO(g)$	z 1g Fe(s) vznikne 0,4 dm ³ CO(g)	-6 559,21	-12 581	-18 471,6	579,0268	y = -29,781x + 17244
7	$3Fe(s) + 4H_2O(g) \longleftrightarrow Fe_3O_4(s) + 4H_2(g)$	z 1g Fe(s) vznikne 0,534 dm ³ H ₂ (g)	-16 245,7	-3 821,01	6136,68	1082,9759	y = 55,956x – 60599
8	$FeO(s) + C(s) \longleftrightarrow Fe(s) + CO(g)$	z 1g C(s) vznikne 1,866 dm ³ CO(g)	-15 180,4	-46 106,9	-77 078,6	701,932	y = -154,75x + 108624
9	$CH_4(g) \longleftrightarrow C(s) + 2H_2(g)$	z 1dm ³ CH ₄ (g) vznikne 2 dm ³ H ₂ (g)	-25 716,9	-48 380,1	-71 078,6	573,298	y = -113,4x + 65012
10	$CaCO_3(s) \longleftrightarrow CaO(s) + CO_2(g)$	z 1g CaCO ₃ (s) vznikne 0,224 dm ³ CO ₂ (g)	10 175	-18 886,7	-47 351,1	870	y = -143,82x + 125128

Vlastnosti sledovaných jednotných bentonitových směsích**Jednotná bentonitová formovací směs**

určená pro výrobu na lince GZ a GF

Složení: Vratný písek
Křemenný písek O-27
Aktivovaný bentonit
Kamenouhelná moučka
Voda na předepsanou vlhkost

Technologické hodnoty směsi:	přístroj	hodnota
prodyšnost	GF-PRA,PED	min. 210 j.p.SI
pevnost v tlaku za syrova	GF-PRA,PFG	160-190 kPa
vlhkost (orientačně)	GF-PIT,PLW	3,5-4,5%
spěchovatelnost	GF-PRA,pos.mě.	35-44%
obsah vyplavitelných látek	GF-PWB,PLW	12,0-15,0%
ztráta žíháním	anal.váhy, pec	3,8-5,0%
celkový uhlík	leco	2,5-3,3
pH vodního výluhu(orientačně)	lab.pH-metr	9,0-9,5
obsah AB	titrace MM	9,0-12,0%

Výpočet degradované směsi, degradovaného bentonitu a oživení formovací směsi

Hmotnost směsi potřebné na jednu formu	49,66 kg
Množství bentonitu ve směsi	8,89%
Množství degradované směsi u varianty 1	2,617%
Množství degradované směsi u varianty 2	2,156%

Varianta 1	Varianta 2
Množství degradovaní směsi v kg:	Množství degradovaní směsi v kg:
100%..... 49,66 kg 2,617%..... x $\left(\frac{2,617}{100}\right) = \left(\frac{x}{49,66}\right)$ $x = \frac{2,617}{100} \cdot 49,66 = 1,300 \text{ kg}$	100%..... 49,66 kg 2,156%..... x $\left(\frac{2,156}{100}\right) = \left(\frac{x}{49,66}\right)$ $x = \frac{2,156}{100} \cdot 49,66 = 1,071 \text{ kg}$
Množství degradovaného bentonitu v kg	Množství degradovaného bentonitu v kg
100%..... 1,300 kg 8,89%..... x $\left(\frac{8,89}{100}\right) = \left(\frac{x}{1,300}\right)$ $x = \frac{8,89}{100} \cdot 1,300 = 0,116 \text{ kg}$	100%..... 1,071 kg 8,89%..... x $\left(\frac{8,89}{100}\right) = \left(\frac{x}{1,071}\right)$ $x = \frac{8,89}{100} \cdot 1,071 = 0,095 \text{ kg}$
Hmotnost vratné směsi	1269 kg
Hmotnost nového ostřiva	25 kg
Množství bentonitu potřebného na oživení vratné směsi: $\frac{1269}{49,66} = 25,554 \text{ forem}$	
Varianta 1	Varianta 2
$25,554 \cdot 0,116 = 2,96 \text{ kg}$	$25,554 \cdot 0,095 = 2,43 \text{ kg}$
Množství bentonitu potřebného na oživení k novému ostřivu : $\frac{25 \cdot 8,89}{100} = 2,22 \text{ kg}$	

Vzorce použité při statistickém vyhodnocení naměřených dat:

a) střední hodnota sledované veličiny:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

kde značí: n - počet měření (n=7) [1]; i - pořadové číslo měření, sledované veličiny [1];
x_i - naměřenou hodnotu sledované veličiny při i-tém měření.

b) směrodatná odchylka sledované veličiny:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

c) rozptyl sledované veličiny:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

d) variační koeficient sledované veličiny:

$$v = \frac{s}{\bar{x}}.$$

V tabulce této přílohy jsou přehledně zpracovány hodnoty statistických výpočtů pro jednotlivé směsi zpracovaných v této práci, které jsou dále rozděleny dle parametrů na základě kterých byli porovnávány.

Tabulka hodnot statistických výpočtů naměřených hodnot této disertační práce

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
komplexní směs, 1000°C	15970	4	6,343382	0,486424	0,236608304	0,0373
	20020	3	8,469251	0,254154	0,06459421	0,007627
	15731	1	8,625478	0,501634	0,251636549	0,029174
	15994	5	7,675432	0,106894	0,011426346	0,001489
	TPR 210 F	6	9,183639	0,915109	0,837423763	0,091186
	15947	2	14,94232	0,794992	0,63201206	0,042297
frakce 0,1 mm, 1000°C	20020	3	12,29359	0,354916	0,125965014	0,010246
	15731	1	18,66159	0,751889	0,565336424	0,030294
	15970	4	13,71815	0,862342	0,743633688	0,054208
	15994	5	14,31255	0,407	0,165648873	0,011574
	15947	2	19,07649	0,472529	0,223283591	0,011705
	TPR 210 F	6	12,50154	0,266249	0,070888297	0,00567
Frakce 0,15 mm, 1000°C	20020	3	11,04803	0,382781	0,146521437	0,013262
	15731	1	10,18032	0,178763	0,031956067	0,003139
	15970	4	9,726974	0,572075	0,327269804	0,033646
	15994	5	8,426514	0,443432	0,196632358	0,023335
	15947	2	13,7648	0,294273	0,086596613	0,006291
	TPR 210 F	6	9,240955	0,451034	0,203431987	0,022014
Frakce 0,3 mm, 1000°C	20020	3	7,824274	0,489275	0,239389994	0,030596
	15731	1	7,900583	0,478215	0,228689187	0,028946
	15970	4	6,292894	0,223923	0,050141368	0,007968
	15994	5	5,948332	0,361039	0,130349185	0,021914
	15947	2	10,77619	0,476465	0,227018444	0,021067
	TPR 210 F	6	7,734825	0,362852	0,131661361	0,017022
Frakce 0,4 mm, 1000°C	20020	3	8,279952	0,383956	0,147422575	0,017805
	15731	1	7,464426	0,2927	0,08567308	0,011478
	15970	4	6,316366	0,526853	0,277574593	0,043945
	15994	5	7,050588	0,179791	0,032324846	0,004585
	15947	2	9,061838	0,70874	0,502311924	0,055432
	TPR 210 F	6	9,889352	0,329744	0,108731053	0,010995

Měření plynotvornosti – pokračování statistických výsledků

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
800°C	Jádro Cold Box	9	4,006033	0,575414	0,331100829	0,082651
1000°C	Jádro Cold Box	9	5,299786	0,357364	0,127709043	0,024097
1200°C	Jádro Cold Box	9	10,87586	0,704474	0,496283367	0,045632
800°C	Jádro CT Ostašov	7	1,589606	0,884444	0,782240858	0,492097
1000°C	Jádro CT Ostašov	7	2,124986	0,217138	0,047148767	0,022188
1200°C	Jádro CT Ostašov	7	1,610146	0,365008	0,133231094	0,082745
800°C	Jádro Dorsil V	11	2,992423	0,417308	0,174146254	0,058196
1000°C	Jádro Dorsil V	11	2,401019	1,243362	1,545948367	0,643872
1200°C	Jádro Dorsil V	11	2,263824	0,923346	0,852567739	0,376605
800°C	Jádro Hot Box	10	6,048995	0,822356	0,676269521	0,111799
1000°C	Jádro Hot Box	10	8,736798	0,343285	0,117844397	0,013488
1200°C	Jádro Hot Box	10	17,80636	2,315286	5,360547459	0,301047
800°C	Jádro Novanol	8	6,757668	0,589747	0,34780128	0,051468
1000°C	Jádro Novanol	8	11,20419	0,359835	0,129480884	0,011556
1200°C	Jádro Novanol	8	17,00904	1,034118	1,069399275	0,062872
800°C	ST52 PAP	12	6,890006	0,336188	0,113022495	0,0487935
1000°C	ST52 PAP	12	10,98907	0,379833	0,144273217	0,0345646
1200°C	ST52 PAP	12	15,72251	0,245303	0,060173995	0,0156020
800°C	ST53 PAP	13	8,049898	0,108439	0,011759183	0,0134709
1000°C	ST53 PAP	13	11,50598	0,078331	0,006135865	0,0068079
1200°C	ST53 PAP	13	15,06671	0,052867	0,002794994	0,0035089
800°C	ST54 PAP	14	7,407057	0,011891	0,000141396	0,0016053
1000°C	ST54 PAP	14	10,45041	0,191500	0,036672506	0,0183247
1200°C	ST54 PAP	14	15,14258	0,014246	0,000202957	0,0009408
800°C	ST55 PAP	15	7,342002	0,166697	0,027787923	0,0227045
1000°C	ST55 PAP	15	10,36072	0,048038	0,002307718	0,0046366
1200°C	ST55 PAP	15	17,14531	0,085785	0,007359178	0,0050034
800°C	ST56 PAP	16	6,156689	0,122577	0,01502514	0,0199095
1000°C	ST56 PAP	16	8,693404	0,237556	0,05643298	0,0273260
1200°C	ST56 PAP	16	13,66938	0,268760	0,072232002	0,0196614
800°C	Ecolotec	17	6,969335	0,164256	0,026980114	0,0235684
1000°C	Ecolotec	17	11,07512	0,054880	0,003011847	0,0049552
1200°C	Ecolotec	17	15,33931	0,155384	0,024144444	0,0101298
800°C	KR-1	18	4,50534	0,520063	0,27046612	0,115432
1000°C	KR-1	18	5,362876	1,314770	1,728622392	0,2451615
1200°C	KR-1	18	10,34618	0,412557	0,170203753	0,0398753
800°C	KR-2	19	4,306522	1,207999	1,459263762	0,2805047
1000°C	KR-2	19	6,283060	0,763096	0,582316525	0,1214530
1200°C	KR-2	19	16,06956	1,542343	2,37882493	0,0959792
1000°C	P-1-CB	20	13,60299	1,031267	1,063513324	0,0758118
1000°C	P-2-CO	21	10,35528	2,104383	4,428428295	0,2032182
1000°C	P-CB-CO	22	5,509910	0,405637	0,164542074	0,0736196
1000°C	Pc-L1	23	28,83021	3,334275	11,11739139	0,1156521
1000°C	Pc-L2	24	27,60842	2,552965	6,51763514	0,0924705
1000°C	Pc-L3	25	23,47817	1,915216	3,668055884	0,0815743
1000°C	P-2-CB	26	16,25743	1,219815	1,48794919	0,0750312
1000°C	P-1-C-V	27	51,36776	1,891211	3,576680859	0,0368170
1000°C	P-2-C	28	41,28138	1,000848	1,001697334	0,0242445
1000°C	P-II-M	29	46,96910	2,599506	6,757434336	0,0553450
800°C	BZK	30	9,528198	0,329711	0,108709939	0,0346038
1000°C	BZK	30	17,89687	2,426259	5,886736482	0,1355688
1200°C	BZK	30	32,08830	1,889622	3,570674161	0,0588882

Měření plynotvornosti – pokračování statistických výsledků

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
800°C	S-B-K	31	6,81	1,979031	3,916564048	0,2906066
1000°C	S-B-K	31	12,09935	0,598334	0,358004085	0,0494517
800°C	S-B-H	32	5,821009	0,792787	0,628511931	0,1361941
1000°C	S-B-H	32	10,83485	0,684265	0,468219669	0,0631541
800°C	S-Š-H	33	8,492321	0,544706	0,296705707	0,0641411
1000°C	S-Š-H	33	19,60867	0,476385	0,226942848	0,0242946
800°C	S-B-K	34	2,943210	1,538631	2,367386293	0,5227731
1000°C	S-B-K	34	5,376138	1,467921	2,154794146	0,2730438
800°C	S-B-H	35	4,563649	1,508740	2,276296578	0,3305994
1000°C	S-B-H	35	6,054387	0,872730	0,761658263	0,1441484
800°C	S-Š-H	36	4,094129	0,877905	0,770717517	0,2144302
1000°C	S-Š-H	36	8,824029	1,001872	1,003747558	0,1135390
800°C	S-B-K	37	4,684268	1,605729	2,578366284	0,3427918
1000°C	S-B-K	37	7,883489	0,836154	0,699153688	0,1060639
800°C	S-B-H	38	5,103350	1,525734	2,327865419	0,2989672
1000°C	S-B-H	38	9,297463	0,106439	0,012759183	0,0234709
800°C	S-Š-H	39	5,108733	1,516130	2,298651921	0,2967722
1000°C	S-Š-H	39	18,06180	1,093022	1,194698342	0,0605156
1000°C	MBK-4	40	4,765434	0,802556	0,644096958	0,1684120
1000°C	MBK-18	41	4,538040	0,914536	0,836377454	0,2015267
1000°C	MBK-24	42	4,162529	0,313035	0,097991083	0,0752031
1000°C	MBK-200	43	8,917534	1,578850	2,492770079	0,1770501
1000°C	MBK-400	44	9,129743	0,088104	0,007762356	0,0096502
800°C	JBS - MJ	45	2,895435	0,132577	0,01701514	0,0006071
1000°C	JBS - MJ	45	9,748265	0,217556	0,04743298	0,0048260
1200°C	JBS - MJ	45	19,86432	0,932577	0,86541514	0,0497095
800°C	Jádro Cold Box	46	4,267324	0,522534	0,27304178	0,0639843
1000°C	Jádro Cold Box	46	5,83214	0,225061	0,05065245	0,0086850
1200°C	Jádro Cold Box	46	13,63124	0,700635	0,49088941	0,0360120
1200	JBS – SG-1	47	13,25342	1,021267	1,04298628	0,0786956
1200	JBS – SG-2	48	15,13212	0,784992	0,61621244	0,0407221
1200	JBS – SG-3	49	19,25345	0,802556	0,64409613	0,0334535
1200	Bentonit C30	50	84,74215	1,791211	3,2084368	0,0378611
1200	Bentonit CB	51	61,23452	1,524632	2,3245027	0,0379606
1200	Bentonit Ekosil	52	98,92312	1,083022	1,1729366	0,0118571
simulace Magma5	JBS - BK	53	-	-	-	-

Tabulka hodnot statistických výpočtů naměřených hodnot této disertační práce

Měření dilatace

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
800°C	ST52 PAP	I.	0,630943	0,114721	0,01316105	0,1818254
1000°C	ST52 PAP	I.	0,478883	0,080182	0,00642926	0,1674365
1000°C post. ohřev	ST52 PAP	I.	0,713462	0,085665	0,007338492	0,1200694
800°C	ST53 PAP	II.	0,700610	0,024446	0,000597625	0,0348929
1000°C	ST53 PAP	II.	0,550165	0,053434	0,002855208	0,0971238
1000°C post. ohřev	ST53 PAP	II.	0,713950	0,136296	0,018576868	0,1909052
800°C	ST54 PAP	III.	0,715956	0,060972	0,003717669	0,0851625
1000°C	ST54 PAP	III.	0,557642	0,072337	0,005232781	0,1297209
1000°C post. ohřev	ST54 PAP	III.	0,595525	0,164780	0,027152729	0,2766982
800°C	ST55 PAP	IV.	0,722603	0,066673	0,004445297	0,0922678

Měření dilatace – pokračování statistických výsledků

Poznámka	Označení směsi	Číslo směsi	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl sledování	Variační koeficient
1000°C	ST55 PAP	IV.	0,543172	0,052472	0,002753319	0,0966030
1000°C post. ohřev	ST55 PAP	IV.	0,671046	0,048122	0,002315732	0,0717119
800°C	ST56 PAP	V.	0,630179	0,105653	0,011162761	0,1676569
1000°C	ST56 PAP	V.	0,606452	0,079613	0,006338278	0,1312769
1000°C post. ohřev	ST56 PAP	V.	0,637252	0,034957	0,001222007	0,0548561
800°C	S-B-K 50 na 50	VI.	0,499431	0,058303	0,003399285	0,1167394
1000°C	S-B-K 50 na 50	VI.	1,487485	0,102164	0,010437642	0,0686828
800°C	S-B-H 50 na 50	VII.	0,506645	0,051066	0,002607775	0,1007930
1000°C	S-B-H 50 na 50	VII.	1,571939	0,172889	0,029890866	0,1099849
800°C	S-Š-H 50 na 50	VIII.	0,526997	0,028506	0,000812597	0,0540915
1000°C	S-Š-H 50 na 50	VIII.	0,897353	0,053340	0,002845187	0,0594418
800°C	S-B-K 75 na 25	IX.	0,714769	0,143836	0,020688871	0,2012343
1000°C	S-B-K 75 na 25	IX.	2,986111	0,293769	0,086300446	0,098378
800°C	S-B-H 75 na 25	X.	0,204121	0,241366	0,058257836	1,1824664
1000°C	S-B-H 75 na 25	X.	2,260394	0,671564	0,450998828	0,2971005
800°C	S-Š-H 75 na 25	XI.	0,754482	0,047888	0,002293276	0,0634715
1000°C	S-Š-H 75 na 25	XI.	1,513766	0,111525	0,012438018	0,0736743