

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI POČÍTAČOVÉ SIMULACE
V OBLASTI TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ FOREM**
VERIFICATION OF COMPUTER SIMULATION IN THE FIELD OF THERMAL PROPERTIES
OF FOUNDRY MOULDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAN ŠUPA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PETR CUPÁK, PH.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Šupa

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

Ověření funkčnosti počítačové simulace v oblasti tepelných vlastností forem

v anglickém jazyce:

Verification of computer simulation in the field of thermal properties of foundry moulds

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověření funkčnosti počítačové simulace v oblasti tepelných vlastností slévárenských forem při odlévání odlitků do keramických slévárenských forem při použití experimentálně zjištěných tepelných vlastností formovacích materiálů z různých druhů ostřiv.

Cíle diplomové práce:

Využít experimentálně zjištěné tepelné vlastnosti formovacích směsí vyrobených s použitím různých druhů ostřiv kyselého i zásaditého charakteru při počítačových simulacích chladnutí a tuhnutí odlitků.

Seznam odborné literatury:

1. SLOVÁK, S., RUSÍN, K. Teorie slévání. Praha: SNTL, 1990. 231 s. ISBN 80-03-00400-4.
2. RUSÍN, K. Technologie slévárenství. Praha: SNTL, 1972. 158 s.
3. HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika část 2 Mechanika - termodynamika. Brno: VUTIUM, 2000. 576 s. ISBN 80-214-1868-0.
4. ČERMÁK, L., MATULA, L. Numerické modelování teplotního pole formy s uvážením vlivu kondenzační zóny. Slévárenství. 2002, č. 8-9, s. 311-317. ISSN 0037-6825.
5. SHIHT, T.-S., HSIAU, S.-S., HONG, C.-H. Movements of Vaporization Interface and Temperature Distributions in Green Sand. Transactions AFS. 1994, vol. 54, p. 481-489. ISBN 0-87433-252-9.
6. NOGOWIZIN, B. Instationäre Temperatur-Vertailungen in den Teilen der Druckgiessform. Giessereivorschung. 2002, vol. 54, no.1, p. 29-37. ISSN 0046-5933.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Cupák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 24.10.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá tepelnými vlastnostmi formovacích směsí slévárenských forem z různých druhů ostřiv a počítačovou simulací tuhnutí odlitku. Cílem je porovnat experimentálně naměřené hodnoty tepelných vlastností formovacích materiálů pojených vodním sklem s hodnotami tepelných vlastností formovacích materiálů pojených organickým pojivem, které jsou obsaženy v simulačním softwaru. Bude také odlit zkušební vzorek, na kterém se vyhodnotí ochlazovací schopnost jednotlivých formovacích směsí na základě posunu tepelné osy. Tyto výsledky budou následně porovnány s výsledky simulace.

Klíčová slova

ostřivo, tepelné vlastnosti, počítačové simulace, slévárenská forma, formovací materiály

ABSTRACT

This diploma thesis deals with thermal qualities of moulding mixtures of foundry mould of various types of sand grains and a computer simulation of the solidification of the cast. The aim of this work is to compare the values of thermal qualities of moulding materials bonded with water glass taken in experimental measurements to the values of thermal qualities of moulding materials connected with organic binding agent contained in simulation software. A sample cast will be moulded in order to evaluate cooling capacities of individual moulding mixtures according the shift of thermal axis. These results will consequently be compared to the results of the simulation.

Key words

sand grains, thermal properties, computer simulation, foundry mould, molding material

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠUPA, Jan. *Ověření funkčnosti počítačové simulace v oblasti tepelných vlastností forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Ověření funkčnosti počítačové simulace v oblasti tepelných vlastností forem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....

Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a za pomoc při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za pomoc a rady se simulačním softwarem, paní Aleně Pavlicové za ochotu a rady při práci v laboratoři a Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za rady při měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za morální i hmotnou podporu při celém studiu.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Ostřiva.....	9
1.2 Křemenné písky.....	10
1.2.1 Písky křídového stáří.....	17
1.2.2 Písky moravské křídové tabule.....	17
1.2.3 Váté písky.....	17
1.2.4 Odpadní písky po plavení kaolinu.....	18
1.3 Nekřemenná ostřiva.....	18
1.3.1 Šamotový lupek.....	18
1.3.2 Bazická ostřiva.....	19
1.3.3 Korund.....	19
1.3.4 Chromit.....	20
1.3.5 Zirkon.....	21
1.3.6 Olivín.....	22
1.3.7 Dunit.....	23
1.3.8 Kerphalite KF.....	24
1.3.9 J – Sand.....	25
1.3.10 Cerabeads.....	26
1.4 Vodní sklo.....	27
1.5 Sdílení tepla.....	31
1.5.1 Sdílení tepla kondukcí (vedením).....	33
1.5.2 Vedení tepla konvekcí (prouděním).....	38
1.5.3 Sdílení tepla radiací (zářením).....	40
1.6 Počítačové simulace slévárenských procesů.....	41
1.6.1 Postup práce při použití simulace.....	42
1.6.2 Matematické metody řešení modelu.....	44
2 Experimentální část.....	47
2.1 Zvolená ostřiva.....	47
2.2 Určení sypané hmotnosti ostřiv.....	47
2.2.1 Použité pomůcky a zařízení.....	47
2.2.2 Postup měření.....	47
2.2.3 Výsledky měření.....	48
2.3 Určení měrné hmotnosti.....	48
2.3.1 Použité pomůcky a zařízení.....	48
2.3.2 Postup měření.....	48
2.3.3 Výsledky měření.....	49
2.4 Stanovení vyplavitelných látek.....	50
2.4.1 Použité pomůcky a zařízení.....	50
2.4.2 Postup měření.....	50
2.4.3 Výsledky měření.....	52
2.5 Síťový rozbor.....	53

2.5.1 Použité pomůcky a zařízení	53
2.5.2 Postup měření.....	53
2.5.3 Výsledky měření	54
2.6 Zkoušky měrné tepelné kapacity na kalorimetru	60
2.6.1 Měření měrné tepelné kapacity kalorimetru.....	60
2.6.2 Měření měrné tepelné kapacity vzorků.....	62
2.7 Měření součinitele tepelné akumulace formovací směsi metodou kalorimetrickou	70
2.7.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály	70
2.7.2 Zhotovení zkušebních těles	70
2.7.3 Zhotovení licích forem	71
2.7.4 Postup měření.....	71
2.7.5 Výsledky měření	75
2.7.6 Vyhodnocení měření.....	78
2.8 Měření součinitele tepelné vodivosti.....	79
2.8.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály	79
2.8.2 Příprava licích forem	79
2.8.3 Postup měření.....	80
2.9 Porovnání ochlazovacích schopností formovacích směsí z jednotlivých ostřiv	85
2.9.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály	85
2.9.2 Postup experimentu	85
2.9.3 Počítačové simulace	91
2.9.4 Zhodnocení výsledků měření	92
Závěr	96
Seznam použitých zdrojů	98
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	101
Seznam příloh	102

ÚVOD

Při výrobě odlitků dochází k odlévání tekutého kovu do dutiny formy. Formy lze rozdělit na 3 hlavní druhy: **[1], [14]**

1. trvalá forma – je vyrobena z vysoce tepelně vodivých materiálů (litina, grafit, ocel, měď) a lze do ní odlévat mnoho kusů odlitků. Nazývá se kokila.

2. polotrvalá forma – je zhotovena z keramických žáruvzdorných materiálů a lze do ní odlít více jak 1 kus odlitku. Po odlití každého kusu je nutné provést opravu formy.

3. jednorázová – lze do ní odlít pouze jeden kus odlitku. Je vyrobena z formovací směsi a po ztuhnutí odlitku se rozbije. Je to nejvíce používaný a nejuniverzálnější druh formy.

Formovací směs pro jednorázové formy se skládá z těchto složek: **[1], [14]**

- ostřivo (žáruvzdorný zrnitý materiál, který tvoří nosnou část formy nebo jádra, je to hlavní složka formovací směsi).

- pojivo (látka, která mezi sebou pojí jednotlivá zrna ostřiva, dodává směsi plasticitu za syrova a pevnost po vytvrzení, je nutné, aby se pojivo po odlití rozpadlo, pojiva mohou být anorganická nebo organická)

- příisady (jedná se o doplňkové komponenty formovací směsi, přidáním těchto látek se může např. zlepšit rozpadavost směsi po odlití nebo zlepšit kvalita povrchu odlitku, jsou to např. grafit, mleté moučky, oleje)

Formovací směsi mohou být modelová, výplňová, jádrová či jednotná. Modelová směs obklopuje model a je většinou připravována z nových surovin. Výplňová směs vyplňuje zbylý prostor formy. Nemusí být už tak kvalitní jako směs modelová, a proto může být vyrobena z již použité směsi nebo regenerátu. Jádrová směs je používána pro výrobu jader. Jelikož jádra bývají většinou celá obklopena tekutým kovem, jsou na jádrovou směs kladeny značné nároky jak z hlediska žáruvzdornosti, tak po odlití z hlediska dobré rozpadavosti. Jednotná směs se používá pro vyplnění celého objemu formy. Nejčastěji se používají jednotné bentonitové směsi, které se mohou použít vícekrát. **[1], [14]**

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Ostřiva

Jako ostřivo se považuje žáruvzdorný materiál s velikostí částic nad 0,02 mm. Má hlavní zastoupení ve formovací směsi. K jeho nejdůležitějším vlastnostem patří tvar zrna a granulometrická skladba. Tyto charakteristiky rozhodují o objemové hmotnosti, pórovitosti, tepelné dilataci a tepelné vodivosti formovací směsi. Ve velké míře mají také vliv na pevnost forem a jader. **[1]**

Jako kritickou velikost částic se považuje 0,02 mm. Menší částice se nazývají vyplavitelné látky. Patří sem jíly, křemenný prach, neplastické částice, různé minerály. Vyplavitelné látky se stanovují plavicí zkouškou dle ČSN 721078. Současná ostřiva by neměla obsahovat více jak 1 % vyplavitelných látek. **[1]**

Pro stanovení vyplavitelných látek se využívá Stokesův zákon pro výpočet rychlosti sedimentace ve vodě, který platí pro částice 0,001 – 0,1 mm. **[1]**

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot r^2 \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (1.1)$$

v ... rychlost sedimentace

g ... gravitační zrychlení

r ... poloměr částice

ρ_1 ... měrná hmotnost vody

ρ_2 ... měrná hmotnost ostřiva

η ... dynamická viskozita vody

Ostřiva můžeme rozdělit:

1. Dle chemické povahy
 - kyselá (křemenné písky)
 - neutrální (šamot, chromit, korund)
 - zásaditá (magnezit)

2. Dle původu vzniku
 - přirozená (křemenné písky, olivín, zirkon)
 - umělá (šamotový lupek, korund, chrommagnezit)

Při odlévání legovaných ocelí reagují kyselá ostřiva se zásaditými oxidy a vznikají připečeniny nebo spečeniny na povrchu odlitků. Manganové oceli proto nemůžeme odlévat do formovacích směsí z křemenných písků. U tenkostěnných odlitků je vhodné používat nátěry. Na masivní odlitky je třeba používat formovací směsi s bazickým ostřivem. U ocelí legovaných křemíkem zase nelze použít bazické ostřiva. Z těchto příkladů je patrné, že nejuniverzálnější jsou neutrální ostřiva. **[1], [4]**

Nejpoužívanějším ostřivem jsou ale křemenné písky. Jejich vlastnosti většinou bohatě dostačují na běžné slévárenské potřeby. Je to nejrozšířenější minerál vyskytující se v přírodě. Při výrobě masivních odlitků je nahrazován ostřivy s větší bodem tavení. **[1]**

1.2 Křemenné písky

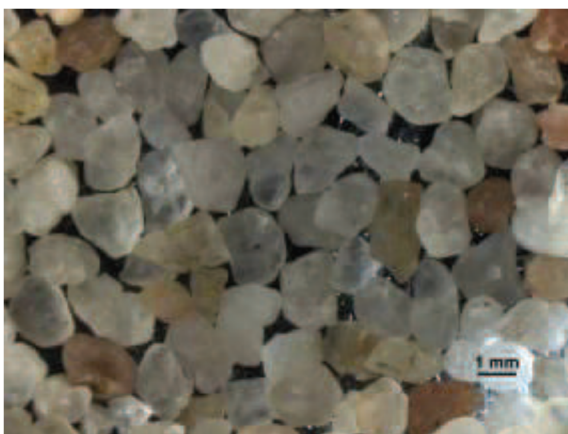
Křemenné písky patří k nejrozšířenějším a nejekonomičtějším slévárenským ostřivům. Hlavním minerálem je SiO_2 (měrná hmotnost 2620 – 2660 kg/m^3 , tvrdost 7, krystalická mřížka trigonálně trapezoedrická).

Pro přípravu syntetických směsí jsou u křemenných písků vyžadovány následující vlastnosti: **[1]**

- a) vysoká mineralogická čistota
- b) vysoká pravidelnost (nejlépe monofrakce)
- c) malá hranatost (kulaté zrna snižují spotřebu pojiva, ale neodolávají tolik změnám teplot)
- d) minimální obsah jemných podílů
- e) neobsahovat hrubší zrna
- f) minimální obsah živců (hlavně pro odlévání oceli, živce mají nízkou teplotu tavení)
- g) střední průměr zrna $d_{50} = 0,22$ mm, u oceli až 0,3 mm (dobrý povrch u výsledných odlitků)
- h) vysoce aktivní povrch zrn

Odstraněním vyplavitelných podílů (pod 0,02 mm) a jemných zrn ostřiva (0,1 mm) se dá zvýšit pevnost směsí. Špatný vliv na pevnost mají také hrubozrné podíly (0,4 – 0,5 mm). Jemné podíly zvyšují spotřebu pojiva, protože mají velký povrch. Nejjemnější podíly způsobují v pojivové obálce vnitřní vruby.

Pro splnění hlavních požadavků na křemenná ostřiva je nejdůležitější jejich původ. Další následné úpravy (např. praní, třídění, sušení) jsou finančně náročné a tedy neekonomické. [1]



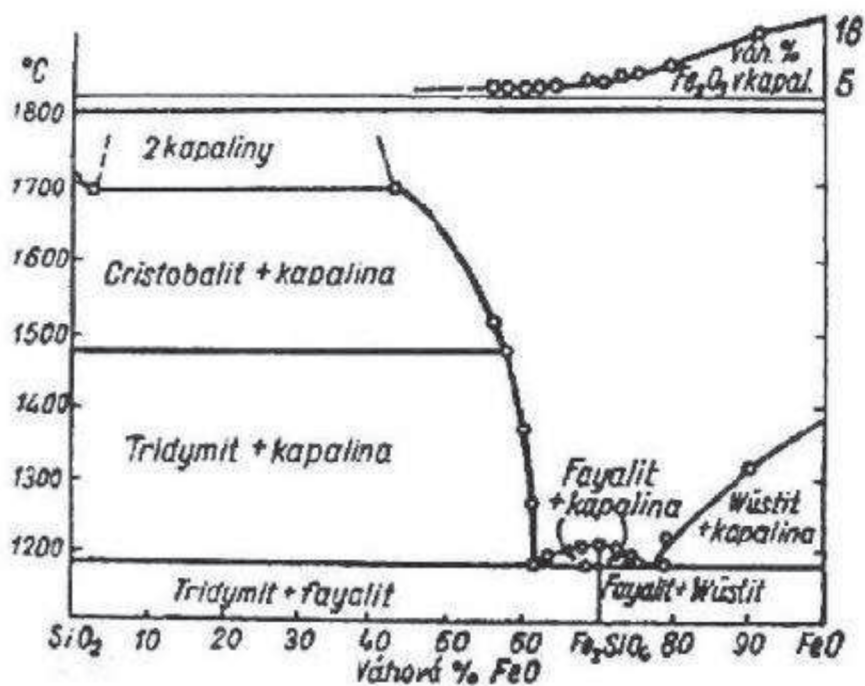
Obr. 1.1 Křemenný písek [10]

Nevýhody křemenných písků: [1]**1. Zvýšená reaktivnost**

Křemen, jako látka kyselá, reaguje se zásaditými látkami. Vznikají tak sloučeniny o nižší žáruvzdornosti. Jako příklad lze uvést reakci SiO_2 a FeO , kde jako výsledná sloučenina vzniká fayalit. [1]

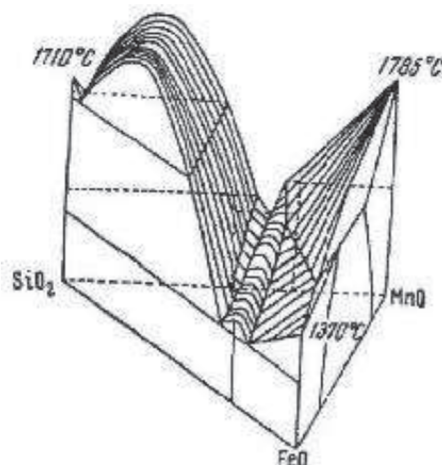


Protože fayalit má teplotu tavení 1205°C , je spojen s penetrací kovu do slévárenské formy a vznikem zapečenin. [1]



Obr. 1.2 Binární diagram $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ [1]

Vstoupí – li do reakce navíc ještě MnO (manganové oceli), teplota tavení se dále snižuje a vzniká ternární eutektikum FeO – SiO₂ – MnO. Proto je třeba u legovaných ocelí a u masivních odlitků používat ostřiva s vyšší žáruvzdorností. [1]



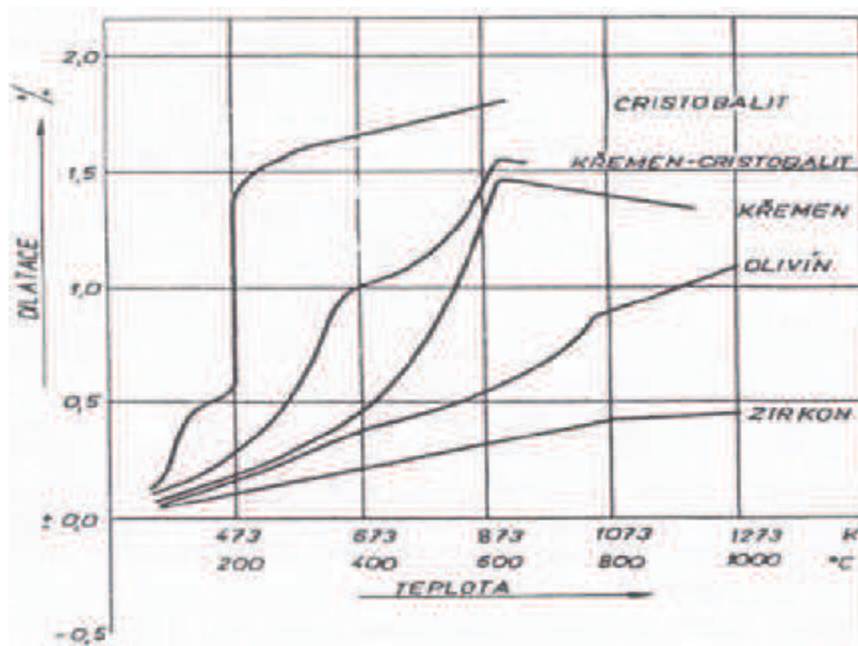
Obr. 1.3 Ternární diagram FeO – SiO₂ – MnO [1]

2. Neplynulá (diskontinuální) tepelná dilatace

Tato vlastnost křemenných písků se považuje za velkou nevýhodu. Neplynulost dilatační křivky je způsobena modifikačními změnami SiO₂. Neplynulá dilatace způsobuje nárůst napětí ve formě při zabrzdění její volné dilatace. [1]

Dilatace každého zrna (tzv. mikrodilatace) se projeví jako makrodilatace formy nebo jádra. Hodnoty mikrodilatace závisí na stupních volnosti jednotlivých zrn ostřiva. Nejvyšší hodnoty napětí jsou u monofrakčních písků s kulatými zrny. [1]

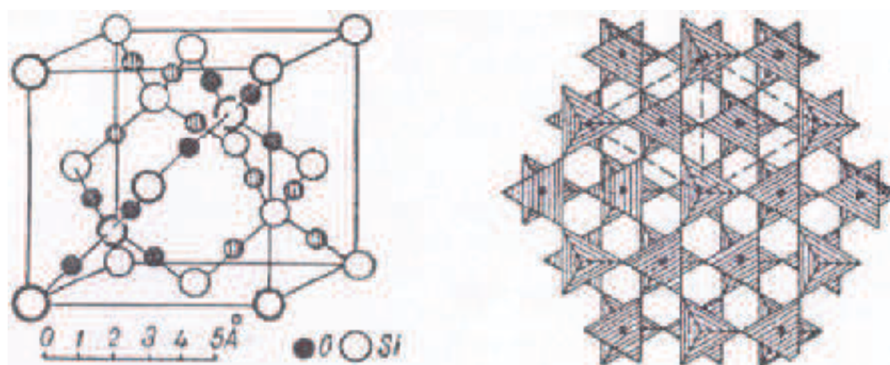
Následkem tepelná dilatace se mohou na odlitku objevovat vady. K nim patří zálupy, výronky, zadrobenky a nárůsty. Jako nejúčinnější opatření proti vzniku těchto vad lze považovat výměnu křemenného ostřiva za ostřivo s nižší tepelnou dilatací a bez modifikačních změn. [1], [5]

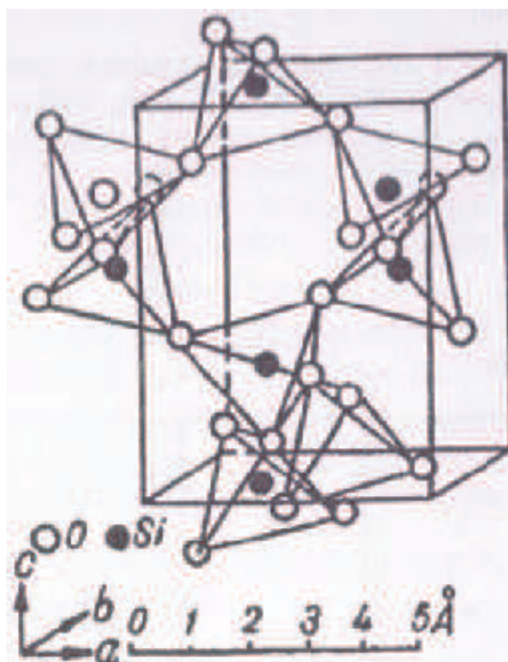


Obr. 1.4 Tepelná dilatace některých druhů ostřiv [1]

3. Cristobalitická expanze

Cristobalit je modifikace SiO_2 . Při ohřevu křemene dochází k jeho přeměně v cristobalit – βSiO_2 . Hexagonální mřížka se mění v mřížku krychlovou. K této přeměně dochází při teplotách 1050 – 1100 °C a je spojena s objemovým růstem 15,7 %. Rychlost přeměny je dána jakostí křemene a přítomností mineralizátorů. Reakce (tzv. cristobalitizace) probíhá v pevné fázi a začíná na volném vnějším i vnitřním povrchu, který má přerušené tetraedrické vazby, což usnadňuje změnu mřížky. Je také značně urychlována kationty různých prvků. [1]

Obr. 1.5 krystalická mřížka SiO_2 [1]

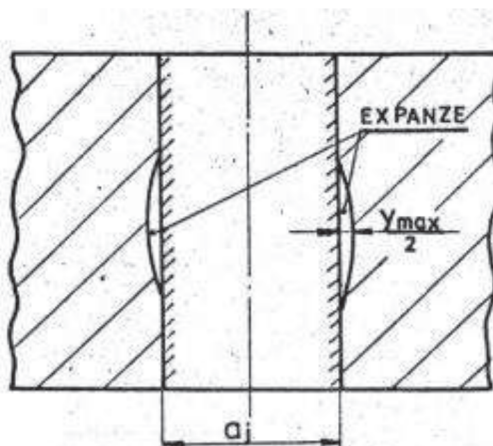


Obr. 1.5 Krystalická mřížka cristobalitu [1]

Cristobalitická expanze byla experimentálně proměřována na řezech zkušebních odlitků, které vedly geometrickými středy pravých válcových jader. Lineární nárůst jader v tepelném středu odlitku se určí vztahem: [1]

$$Y_{\max} = \frac{y_{\max}}{a_j} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

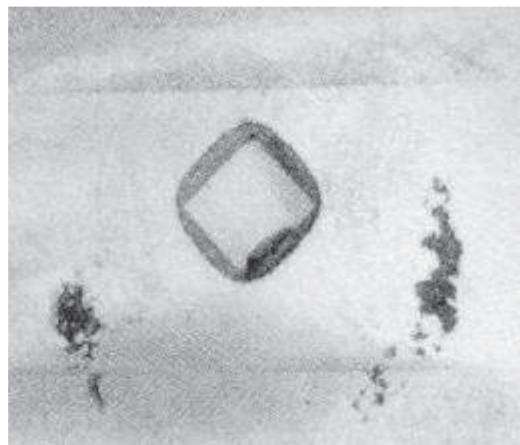
a_j ... původní průměr jádra



Obr. 1.6 Schéma měření cristobalitické expanze [1]

Hlavní důsledky cristobalitické expanze:

- při vyšším tepelném namáhání forem a jader vyrobených z křemenných ostřiv nelze zaručit jejich rozměrovou a tvarovou přesnost
- zapečeniny u ocelových odlitků
- u jader s nižším tepelným namáháním roste zbytkové napětí a zhoršuje se rozpadavost
- vznik silikozy



Obr. 1.8 a Obr. 1.9 Následky cristobalitické expanze na rozměrech a tvarech předlitých děr

4. Silikoza

Silikoza je vážná plicní choroba, vznikající vdechováním křemenných prachových částic o velikosti 0,003 – 0,005 mm. Má se za to, že kromě prachu, je hlavní složkou způsobující silikozu cristobalit. Ten je ve zvýšené míře přítomen u všech forem z křemenného ostřiva pro odlévání oceli. Rovněž v místech zapečenin ocelových odlitků se nachází až 5 % cristobalitu. Vlivu křemenného prachu jsou nejvíce vystaveni pracovníci v čistírnách ocelových odlitků. [1]

1.2.1 Písky křídového stáří

Patří sem písky Provodín T2S, Střeleč T2S, Střeleč KM, Srní. Tyto písky jsou málo znečištěny jílovými minerály a mají malé procento vyplavitelných látek. Jsou jen lehce povrchově znečištěná železitými sloučeninami. Zrna písku jsou izometrická, středně zaoblená. Písky jsou bez živců, a proto se hodí na formovací směsi pro ocelové odlitky. **[1]**

1.2.2 Písky moravské křídové tabule

Jedná sem o písky Dolní Lhota 0-23, Dolní Lhota 0-38 a Boskovice. Jsou ve srovnání s předchozími písky méně čisté. Na povrchu se vyskytují železité povlaky. Obsah živců je do 1 % a tvarová charakteristika je obdobná jako u písků předcházejících. **[1]**

1.2.3 Váté písky

Vyskytují se v moravsko – slovenském pomezí. Vyznačují se vysokou kulatostí zrn. **[1]**

Šajdíkovy Humence ŠH (22 a 27)

Vysoce kulaté s minimálním procentem vyplavitelných látek. Písky jsou dosti pravidelné a mají hladká zrna. Nehodí se pro odlévání oceli z důvodu vysokého obsahu živců. Jde o nejlepší písek pro organická pojiva. **[1]**

Strážnice

Je méně čistý a má větší procento vyplavitelných látek než ŠH. Obsahuje vyšší koncentraci živců a proto je více nasákový. Zrna jsou dobře opracována s hladkým povrchem. **[1]**

Mostkový Les

Má kulaté a hladké zrno. Obsah živců je obdobný jako u písku Strážnice, avšak má více vyplavitelných látek. [1]

1.2.4 Odpadní písky po plavení kaolinu

Hlubany

Písek má kulaté zrno a obsahuje asi 10 % zrn rozložených živců. Zrna jsou velmi porézní a zvyšují nasákavost písku. Je zde vysoký obsah vyplavitelných látek. Není vhodný pro organická pojiva (metody CB a HB), ale je dobrý do skořepinových a furanových směsí. [1]

Kaznějov

Je to odpadní písek s vysokým procentem vyplavitelných látek a má řadu nevýhod. Má ostrohranná neopracovaná zrna a je značně porézní (vysoká nasákavost). Do směsí s organickými pojivy je ještě horší, než písek Hlubany. [1]

1.3 Nekřemenná ostřiva

1.3.1 Šamotový lupek

Získává se vypalováním vysoce žáruvzdorných břidličnatých jílu v rotačních pecích za teploty 1200 °C. Jde zde o přeměnu kaolinitického jílu na mullit ($3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2$). Po mletí a třídění dostáváme ostrohranné umělé ostřivo s plynulou dilatační křivkou. Hodí se pro pojivové systémy s kaolinitickými jíly, vodním sklem i organickými pojivy. Používá se především na výrobu jader. Ostřivo má neutrální až slabě kyselý charakter a s rostoucím podílem Al_2O_3 roste jeho žáruvzdornost. [1]

1.3.2 Bazická ostřiva

Jedná se o drcený vratný žáruvzdorný materiál. Patří sem magnezit, magnezitchrom a chrommagnesit. Výhodou těchto materiálů je, že již neprodělávají objemové změny při vysokých teplotách. Charakteristické je pro ně vysoká tepelná vodivost, nízký koeficient lineární roztažnosti a nízký modul pružnosti. Mají proto velkou odolnost vůči náhlým změnám teploty. Nevýhodou těchto ostřiv je nemožnost pojít je umělými pryskyřicemi vytvrzovanými kyselými katalyzátory (furan). [1]

Chrommagnezit je nejvhodnějším ostřivem do formovacích směsí pro těžké ocelové odlitky. Nahrazuje směsi chromitové a také velmi drahé zirkonové směsi. [1]

1.3.3 Korund

V přírodě se vyskytuje jako minerál safír a korund, nečisté druhy jsou známé jako smirek. Ve slévárenství se používá umělé ostřivo – elektrokorund (Al_2O_3). Obsahuje asi 53 % Al, měrná hmotnost se pohybuje od 3300 do 4000 kg/m^3 , bod tavení 2050°C a tvrdost 9. Vyskytuje se celkem ve 4 modifikacích.

Nejpoužívanější je α - Al_2O_3 . Ten je vysoce netečný vůči oxidům železa a je stálý. Požívá se pro směsi s jíly, vodním sklem i organickými pojivy. Jeho cena je ovšem značná, proto se více používá jako plnivo do nátěrů forem. Z důvodů jeho vysoké tvrdosti se do plniva dostává určité množství železa z drtičů. Je proto nutné korund chemicky nebo magneticky čistit. [1]



Obr. 1.10 Umělý korund [11]

1.3.4 Chromit

Je tvořen základním materiálem ze skupiny chromových spinelů – chromitem ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$). Obsahuje asi 68 % Cr_2O_3 a 32% FeO . Měrná hmotnost je $4400 - 4600 \text{ kg/m}^3$, teplota tavení 2180°C a tvrdost 5,5. Ztráta žháním by měla být okolo 0,5 %, tepelná dilatace je lineární. [1]

Tab. 1.1 Průměrné chemické složení slévárenských chromitových písků [1]

Cr_2O_3	44 – 47 %
Fe_2O_3	25 – 27 %
Al_2O_3	12 – 15 %
MgO	6 – 10 %
SiO_2	1 – 1,8 %
MnO	0,15 – 0,2 %
CaO	0,1 %

Zrna chromitu jsou převážně hranatá s tupými hranami a hladkým povrchem. Používá se na výrobu CT směsí (vodní sklo vytvrzované CO_2 , vazných CT směsí (vodní sklo + bentonit), jádrových směsí s fenolrezolickým pojivem a ST směsí vodní sklo – ester. U chromitových CT směsí je velmi špatná rozpadavost, ale vysoká žáruvzdornost a jakost povrchu. Jádrové směsi s fenolrezolickým pojivem mají velmi dobrou rozpadavost a tvoří povrch odlitku s vysokou jakostí. ST chromitové směsi se používají jako formovací i jádrové, mají dostačující rozpadavost a tvoří jakostní povrch odlitků. Směsi s chromitovým ostřivem se používají také na ochlazování tepelných uzlů. Nevýhodou je vysoká cena ostřiva. [2]

Chromitové formovací směsi mají obecně velkou odolnost vůči zapékání odlitků, proto nachází hlavní uplatnění při výrobě masivních ocelových odlitků. [1]



Obr. 1.11 Chromit [12]

1.3.5 Zirkon

Jedná se o směs ZrO_2 , SiO_2 a ZrO_2 . Měrná hmotnost se pohybuje od 4560 do 4720 kg/m^3 , tvrdost je 7,5 a teplota tavení asi 1900°C. [1]

Tab. 1.2 Typické chemické složení zirkonového ostřiva [2]

ZrO_2	cca 62 %
SiO_2	cca 32 %
Fe_2O_3	cca 0,3 %
TiO_2	cca 0,55%
Al_2O_3	cca 0,2%
CaO	cca 0,43 %

Oproti křemenným pískům má zirkon následující výhody: [1]

- lineární tepelná dilatace
- vysoký koeficient tepelné akumulace a vyšší ochlazovací účinek
- chemická netečnost vůči oxidům železa, odolnost proti zapékání a penetraci

Zirkon má zakulacená zrna s hladkým povrchem. Používá se ve směsi s křemenným ostřivem v CT pojivových systémech. S fenolrezolickým pojivem se opět používá ve směsi s křemenným ostřivem na jádra. Pro více tepelně namáhaná jádra se používá čistý zirkon. Povrch jader z čistého zirkonu má vynikající povrch. U ST zirkonové směsi se dosahuje velmi kvalitních povrchů odlitku a výborné rozpadavosti směsi. [2]

Vzhledem k vysoké ceně se používá jen v omezené míře a pro speciální účely nebo jako plnivo do slévárenských nátěrů. [1]



Obr. 1.12 Zirkonové ostřivo [2]

1.3.6 Olivín

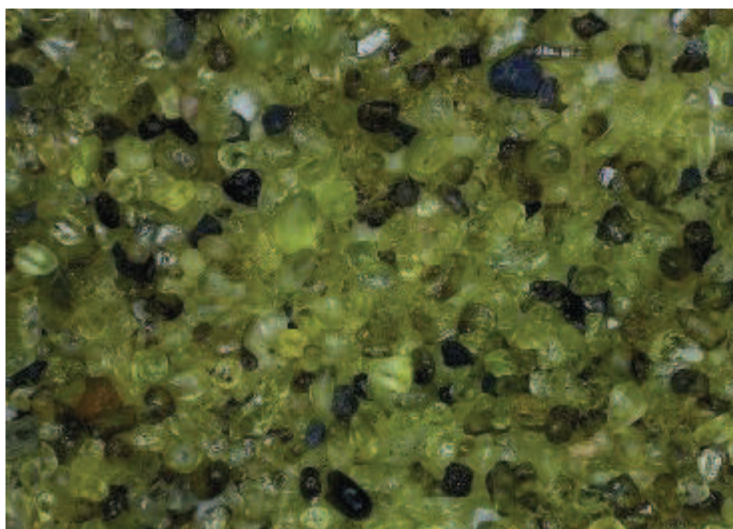
Je to materiál sopečného původu s vysokým obsahem hořčíku. Jedná se o tuhý roztok forsteritu (Mg_2SiO_4) a fayalitu (Fe_2SiO_4) s přísadou některých dalších minerálů. Má neutrální až slabě zásaditou povahu. Měrná hmotnost je asi 3170 kg/m^3 , počátek spékání 1370°C a lineární roztažnost při 1000°C je asi 1,3%. [2], [1]

Tab. 1.3 Typické chemické složení olivínového ostřiva [2]

MgO	min. 49 %
SiO ₂	max. 42 %
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ + CaO	max. 9 %

Olivín má zaoblené zrna s hladkým povrchem. Kvůli jeho bazické reakci v žáru je vhodný pro odlévání manganových ocelí. U odlitků lze dosáhnout vysoce jakostních povrchů. U ST i CT směsí s olivínovým ostřivem je lepší rozpadavost než u směsí s ostřivem chromitovým, avšak horší než při použití dunitového ostřiva. Olivín má také vyšší cenu a horší dostupnost na trhu než dunit. [2]

Při odlévání do forem z olivínových formovacích směsí je třeba si dávat pozor na množství plynů a par vznikajících termickým rozkladem sekundárních minerálů. Toto může vést ke značné bublinatosti odlitků. [1]



Obr. 1.13 Olivínové ostřivo [13]

1.3.7 Dunit

Jinak nazývaný také magnolit. Jedná se o speciální slévárenské ostřivo. Vyrábí se sintrováním dunitu při teplotách 1500 – 1600 °C. Je mineralogicky podobný jako olivín. Měrná hmotnost je 3100 kg/m³, počátek spékání nastává při 1380°C a lineární roztažnost při 1000°C je 0,6 %. [2], [1]

Tab. 1.4 Typické chemické složení dunitového ostřiva [2]

MgO	49,6 %
SiO ₂	41 %
Fe ₂ O ₃	8,2 %
CaO	0,2%

Ostřivo se vyznačuje zrny s nepravidelným tvarem a drsným porézním povrchem. Výborně se hodí na výrobu odlitků z manganových ocelí, ale také odlitků z LLG a LKG. Povrch odlitků je velmi jakostní. Rozpadavost formovací směsi je výborná a to jak CT, tak i ST směsi. Oproti chromitu a chrommagnezitu, ze kterých byly dříve vyráběny formovací směsi pro odlévání manganových ocelí, kleslo množství připečenin, trhlin a zavalenin. Ve srovnání s olivínem a chromitem mají dunitové formovací směsi velmi dobrou rozpadavost, což může ušetřit až 50 % času na cidírenské operace. Kvůli vyššímu podílu prachových částí je ovšem u dunitu asi o 50% větší spotřeba pojiva, proto je méně vhodný pro směsi pojené organickými pojivy. [2]



Obr. 1.14 Dunitové ostřivo [2]

1.3.8 Kerphalite KF

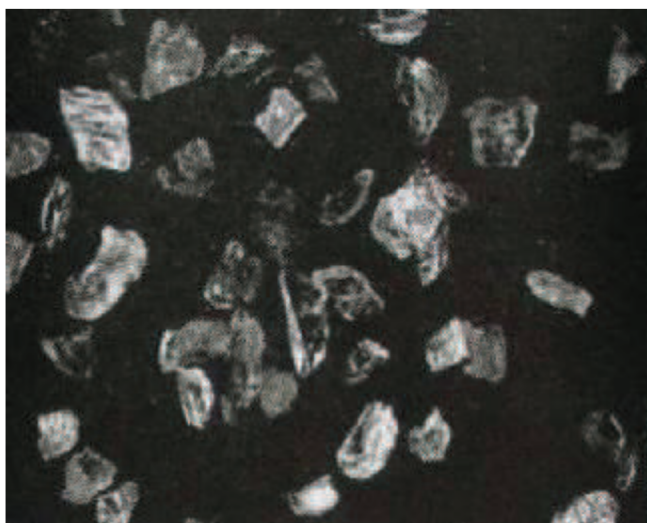
Je to drcený a tříděný aluminosilikát – andalusit. Má ostrohranné zrno a velmi vysokou žáruvzdornost (až 1850°C). Měrná hmotnost je 3200 kg/m³, počátek spékání 1740°C, průměrná velikost zrna je 0,23 mm a lineární roztažnost 6,5%. Ostřívo má neutrální charakter. [6], [7], [14]

Andalusit je silikát hliníku (Al₂SiO₅) a má rombickou krystalickou strukturu. Vzniká za nízkých tlaků v břidlicích a rohovcích, které vznikají kontaktní metamorfózou jílu. Jeho barva může být šedá, růžová, červená, červenohnědá, hnědá. Méně často se vyskytuje v barvě bílé, žluté, zelené, modré. Tvoří sloupcové krystaly a ty jsou většinou neprůhledné a matné. Mohou se ovšem vyskytnout i jako skelně lesklé, průsvitné až čiré. Poprvé byl andalusit popsán ve španělské Andalusii z masivu Rondo. Odtud také pochází jeho název. V České republice se andalusit vyskytuje v Dolních Borech u Velkého Meziříčí, v Čejově u Humpolce, na vrchu Pancíř na Šumavě nebo u Horní branné na Šumpersku. Zahraniční ložiska jsou ve Španělsku, Německu, USA a Austrálii. Andalusit je velmi odolný a proto se shromažďuje ve formě zrn a valounků v říčních náplavech. [15]

Kerphalite má sice vyšší cenu, ale zato má velmi dobrou tepelnou stabilitu. Použití tohoto ostříva vede k výborné jakosti výsledných povrchů odlitků. Lze jej použít pro všechny pojivové systémy, ale z důvodů hranatosti jeho zrn je potřeba počítat s vyšší spotřebou pojiva. V současné době se pomocí Kerphalitu nahrazují směsi s chromitovým a zirkonovým ostřivem. V Německu se každoročně používá 1 000 tun Kerphalitu při výrobě obalovaných písků a jader metodou CB. V České republice bylo dosaženo velice dobrých výsledků použitím tohoto ostříva při výrobě prototypů komplikovaných dieselových motorů se 4 a 6 válci. Blok a hlava válců byly v tomto případě odlévány v jednom kuse. [6], [7]

Tab. 1.5 Chemické složení Kerphalitu [8]

Al ₂ O ₃	61 %
SiO ₂	38 %
Fe ₂ O ₃	0,5 %
K ₂ O + Na ₂ O + MgO + CaO	< 0,5 %

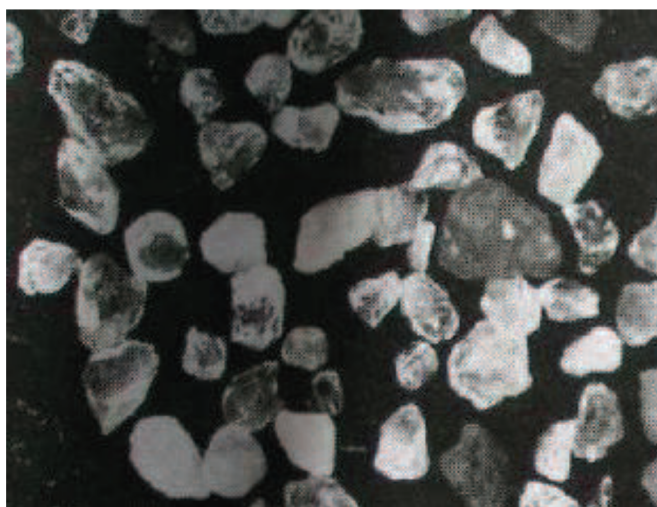


Obr. 1.15 Kerphalite KF [6]

1.3.9 J – Sand

Skládá se z minerálů křemíku a živce. Má neutrální charakter, lineární roztažnost 13,7 % a počátek spékání je při teplotě 1440°C.

Je to levné ostřivo, které se používá pro jádra olejových kanálů, vodních plášťů motorů a klikových skříní. Další možností využití jsou výfuková potrubí z vysokolegovaných litin. Jádra jsou nejčastěji vyráběny metodou CB. Nízká tepelná stabilita ostřiva může však někdy vést k problémům. v Německu se v současné době používá asi 12 000 tun za rok. [6]



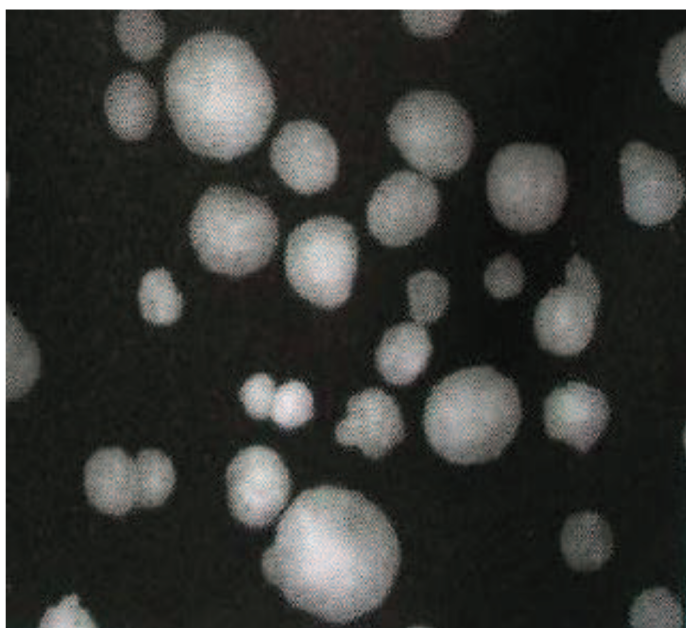
Obr. 1.16 Ostřivo J – Sand [6]

1.3.10 Cerabeads

Jedná se o aluminosilikát (mullit). Má neutrální charakter, tepelná roztažnost je 4% a počátek spékání 1740°C. Vyznačuje se velmi dobrou prodyšností a při vstřelování jader také výbornou zabíhavostí. Rozpadavost je dobrá, proto lze směs odstranit i z malých a těžko přístupných dutin a kanálků.

[6], [9]

Je to plně syntetický produkt firmy Hüttenes – Albertus. Jeho cena je vysoká, avšak jeho efektivita je výborná. Používá se pro výrobu velmi komplikovaných jader – tenké olejové kanálky, mezery vodních plášťů, automobilové motory, ventily pro hydrauliku, tělesa turbokompresorů, brzdové a brusné kotouče, části hudebních nástrojů. **[6], [7] [9]**



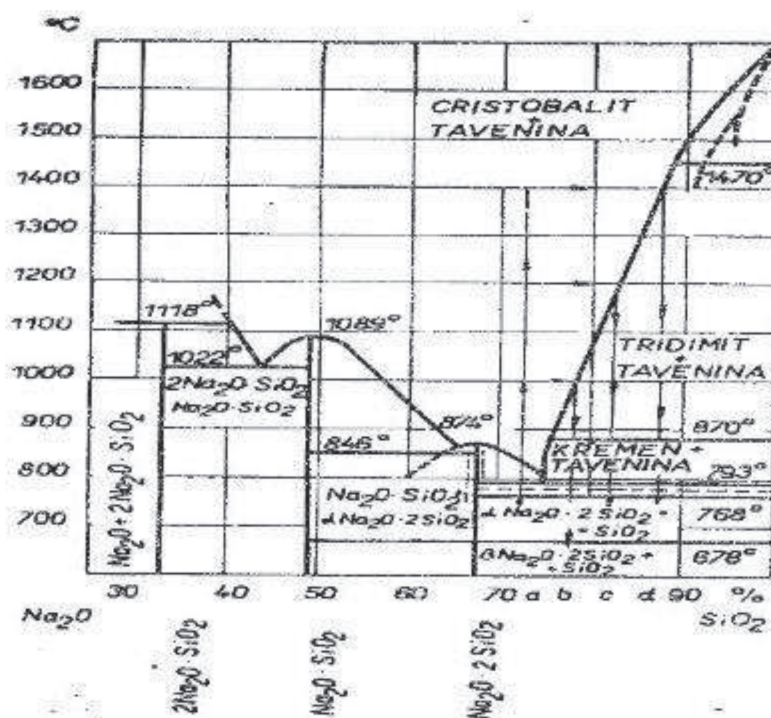
Obr. 1.17 Ostřivo Cerabeads **[6]**

1.4 Vodní sklo

Vodní sklo je vodný roztok křemičitanu sodného (Na_2SiO_3). Objevil jej J.N.Fuchs v roce 1818 v Německu. [20]

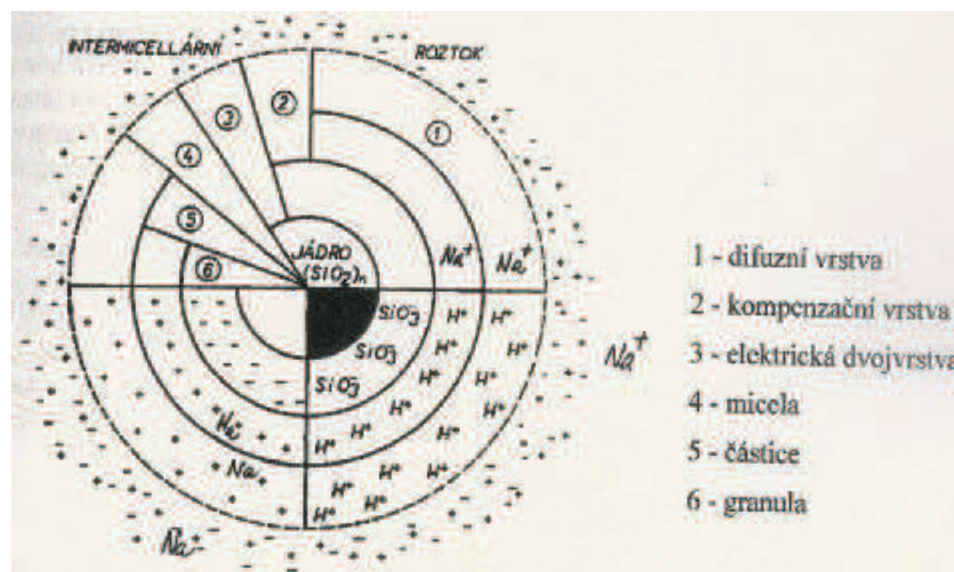
Jelikož jsou přírodní křemičité materiály podstatnou částí zemské kůry, jsou syntetické křemičité materiály vhodnou náhradou za ekologicky závadné materiály a jejich použití je rozšířené. Základní surovinou je v tomto případě křemenný písek jako základní zdroj křemíku. [14], [16]

Vyrábí se ze sklářského písku (70 – 75 % SiO_2) tavením v kontinuální sklářské vanové peci za pomoci alkalických tavidel (nejčastěji soda) při teplotách 1400 – 1600 °C. Alkalická tavidla usnadňují tavení písku. Roztavená sklovina se pak prudce zchladí, aby popraskala na co nejmenší části. To usnadňuje následné rozpouštění. Tento materiál je pak za pomoci hydroxidu sodného nebo draselného, tlaku, teploty a vody rozpouštěn v rotačním autoklávu na tekuté vodní sklo. Jiným způsobem výroby vodního skla je tavení křemičitého písku přímo v autoklávu za pomoci hydroxidu, teploty a tlaku. Tímto způsobem lze ovšem vyrábět jen určité druhy sodných vodních skel. [19], [20]



Obr. 1.18 Binární diagram $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ [20]

Vodní skla jsou koloidní disperzní systémy tvořeny disperzními částicemi (tzv. micelami) a disperzním prostředím (tzv. intermicelární roztok). Podle stupně polykondenzace silikátových aniontů mají částice vodního skla velikost 1 – 500 nm. Dva morfologické stavy vodního skla (sol, gel) mají vliv na jeho koloidní vlastnosti. Sol je disperzní soustava a gel tvoří přechodovou soustavu mezi solem a pevnou látkou. [20]



Obr. 1.19 Struktura koloidní částice sodného silikátu [20]

Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno tzv. modulem: [19]

$$m = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \quad (1.4)$$

Hodnota křemičitého modulu bývá u běžně vyráběných vodních skel 1,6 – 4,1. Kromě modulu se k charakterizaci vodního skla používá hustota, viskozita a pH. Viskozita závisí na koncentraci a na hodnotě křemičitého modulu výchozí skla. Je potřeba vzít v úvahu, že vodní sklo se chová jako newtonská kapalina, proto jeho viskozita závisí na způsobu měření této vlastnosti. Hodnota pH je také závislá na chemickém složení a koncentraci. Vodní skla jsou silně zásaditá. [19]

Na vlastnostech vodního skla se podílejí chemické složení, které je vyjádřeno pomocí modulu, koncentrace a způsob a podmínky výroby. Na strukturu vodního skla mají vliv stupeň disperzity a hydratace výchozí taveniny sodných křemičitanů. Ve slévárenství se nejčastěji používají vodní skla s hodnotou modulu 2 - 3. Zároveň s modulem se mění i hustota vodního skla. Ta se zjišťuje Bauméovými hustoměry. **[14], [16]**

Nejčastěji používaná jsou sodná vodní skla: **[14], [16]**

- „řídká“, hustota 36 – 38 °Bé, $m = 3 - 3,2$
- „hustá“, hustota 48 – 50 °Bé, $m = 2,2 - 2,6$
- „směsná“, hustota 40 – 44 °Bé, $m = 2,6 - 2,8$

Důležitá vlastnost, která určuje rychlost tvoření silikátové vazby při vytvrzování slévárenských směsí, je molekulární poměr křemičitanu sodného v koloidním roztoku. Vodní skla s vyšším modulem jsou více reaktivní. Rozdílné hodnoty modulů mají za následek rozdílně pevnou strukturu po vyschnutí. Vodní sklo s modulem $m = 1$ dává tvrdou krystalickou hmotu, s modulem $m = 2$ produkuje sklovitou tuhou hmotu. Vodní skla s vyššími moduly např. $m = 3,3$ dávají drobnou hmotu. **[16]**

Vodní skla se využívají k různým účelům. Jako přísada do odmašťovacích, pracích a čisticích prostředků, ve stavebnictví, při výrobě svařovacích drátů. Avšak zdaleka nejrozšířenějším využitím je používání sodného vodního skla ve slévárenských směsích při výrobě forem a jader. **[14], [19]**

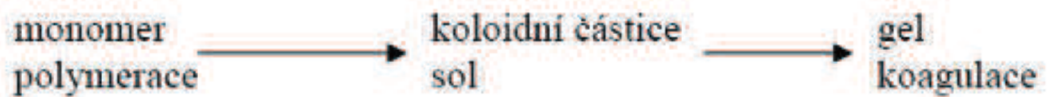
Formovací a jádrové směsi s vodním sklem lze vytvrzovat několika způsoby: **[20]**

1. Chemické vytvrzování:

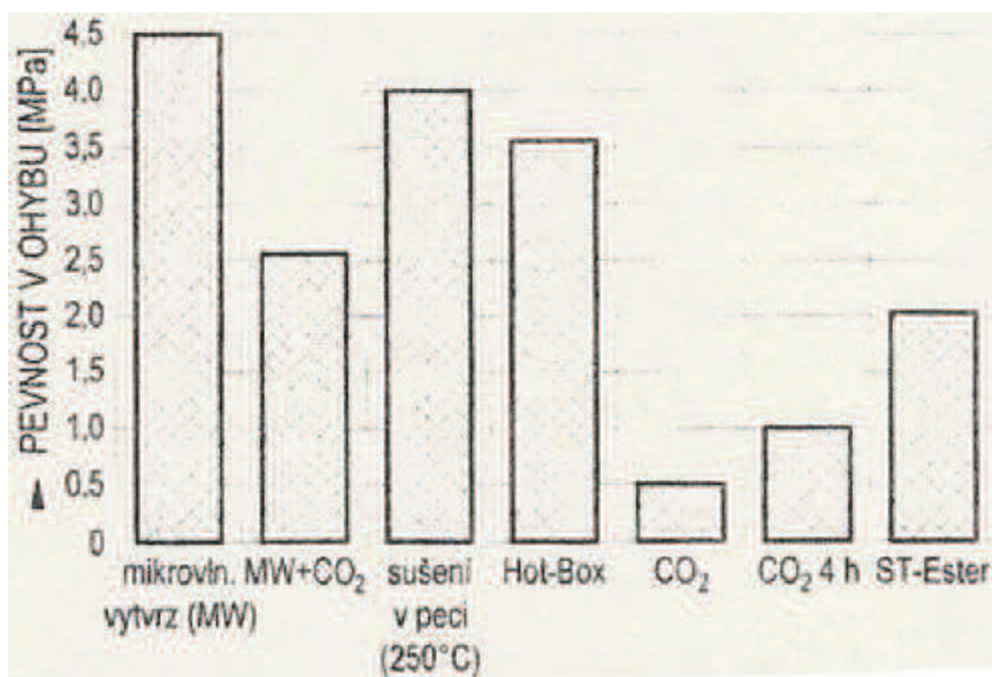
- CO_2 – *proces* (jedná se o profukování směsi s vodním sklem oxidem uhličitým za tvorby pojivového gelu a vedlejších produktů)
- *vytvrzování kapalnými tvrdidly* (tvrdidla esterového typu – dvacetin, triacetin)
- *vytvrzování pevnými tvrdidly* (cement, ferosilicium; málo používané)

2. Fyzikální vytvrzování – dehydratace

- metoda *HOT – BOX*
- profukování horkým vzduchem
- mikrovlnný ohřev



Obr. 1.20 Přeměna solu na gel [16]



Obr. 1.21 Srovnání pevností směsí s vodním sklem při různých způsobech vytvrzování [20]

1.5 Sdílení tepla

Sdílení tepla probíhá, když jedna látka předává teplo látce druhé. Toto se řídí druhým zákonem termodynamiky. Je obecně známo, že teplo nemůže přecházet z látky o nižší teplotě na látku o teplotě vyšší. Látky o různých teplotách se snaží pomocí předávání tepla vyrovnat svou teplotu neboli dosáhnout rovnováhy. [14], [3]

Procesy sdílení tepla jsou pro přírodu na Zemi velmi důležité z hlediska zachování života. Nejdůležitější je sdílení tepla mezi Sluncem a Zemí. V průmyslových procesech je sdílení tepla využíváno při sušení, ohřevu, tavení, větrání a je nedílnou součástí oblastí, jako jsou stavebnictví (tepelná izolace budov), energetika (rozvody tepla a teplé vody) a techniky prostředí (klimatizace a vytápění). [21]

Jako nutná podmínka pro sdílení tepla je rozdíl teplot v různých bodech prostoru a různých bodech dané látky. Pro množství tepla, které se vymění mezi různými body prostoru je rozhodující teplotní gradient neboli velikost teplotního spádu. Ten je definován pro 2 izotermní plochy s rozdílem teploty Δt a vzdáleností mezi nimi v kolmém směru dx takto: [21]

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) = \frac{dt}{dx} \quad (1.5)$$

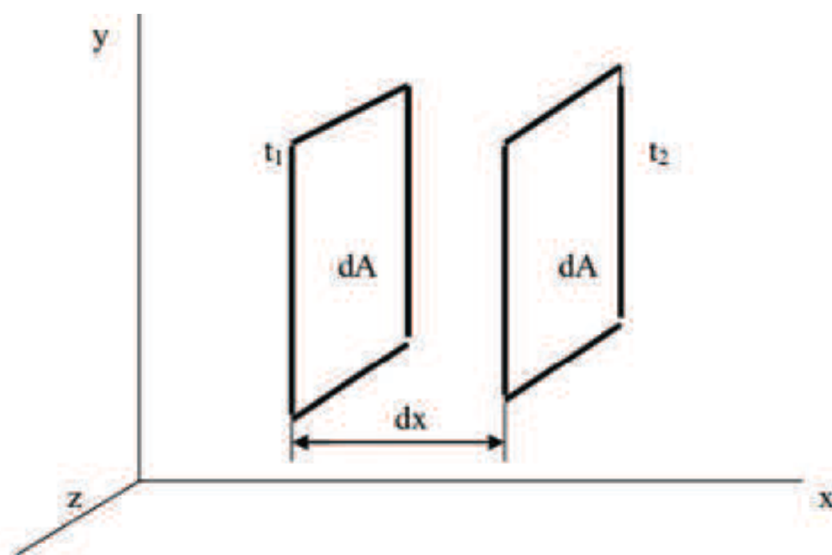
V jakémkoliv bodu prostoru je obecně teplota funkcí polohy tohoto bodu v prostoru a jeho teploty. Za neustálených podmínek platí, že teplota je funkcí polohy bodu, definovaného pomocí souřadnic, a času. [21]

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1.6)$$

x, y, z ... souřadnice bodu

t ... teplota

τ ... čas



Obr. 1.22 Sdílení tepla [21]

Za předpokladu nerovnosti teplot t_1 a t_2 dochází mezi plochami dA ve vzdálenosti dx k výměně množství tepla o velikosti dQ . Hustota tepelného toku dq je množství tepla vyměněné na jednotce plochy za časovou jednotku.

$$dq = \frac{dQ}{dA \cdot d\tau} \quad [J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (1.7)$$

Sdílení tepla probíhá třemi základními mechanismy a to tak, že buď každým mechanismem zvlášť nebo jejich kombinací. Základní mechanismy jsou: [21]

- kondukce (vedení)
- radiace (vyzařování)
- konvekce (proudění)

1.5.1 Sdílení tepla kondukcí (vedením)

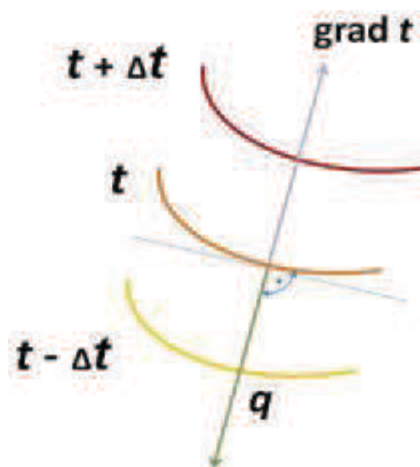
Při kondukcí je přenos tepla realizován přímým kontaktem mezi tělesy o rozdílných teplotách. Teplo se přenáší z tělesa teplejšího na těleso studenější a to tak, že dochází ke vzájemným srážkám stavebních částic hmoty (atomy, molekuly). Tím si tyto částice předávají svou kinetickou energii, což se navenek projeví vedením tepla a následnou změnou teploty. Rychleji se pohybující teplejší molekula při srážce předá svou energii studenější, pomaleji se pohybující, molekule. Ta se začne pohybovat rychleji. Původně teplejší rychlejší molekula ztratí část své energie, zpomalí se a sníží teplotu. Při dostatku času dojde u těchto částic k vyrovnání teplot. Rychlost přenosu tepla závisí na velikosti rozdílu teplot dotýkajících se těles. Tento způsob vedení tepla se přednostně uplatňuje u těles o pevném skupenství. U kapalných a plynných látek je tento pochod druhořadý. [21], [26]

Velikost tepelného toku vedením je dána Fourierovým zákonem tepelné vodivosti: [22]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.8)$$

λ ... součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Tento zákon lze také graficky znázornit (viz Obr. 1.23). Vektory q a $\text{grad } t$ leží na jedné přímce, avšak v opačném směru. To je dáno tím, že teplo se předává z oblasti teplejší do oblasti chladnější. Proto je také v rovnici uvedeno znaménko minus. Protože se jedná o stacionární vedení tepla, není zde uvažováno s časovou složkou. [22]



Obr. 1.23 Grafické znázornění Fourierova zákona [22]

Lze odvodit tzv. Fourierovu rovnici vedení tepla stacionárním prostředím: **[21]**

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (1.9)$$

a ... součinitel teplotní vodivosti

t ... teplota

τ ... čas

Součinitel **a** je termofyzikální parametr látky a udává rychlost změny teplotního pole. Za předpokladu ustáleného vedení tepla je levá strana rovnice, udávající časový vliv, rovna nule. **[14], [21]**

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad \mathbf{[21]} \quad (1.10)$$

a ... součinitel teplotní vodivosti

c_p ... měrné teplo

ρ ... hustota látky

Čím vyšší bude hodnota součinitele **a**, tím rychleji se změna teploty na povrchu projeví uvnitř tělesa. **[14]**

Součinitel tepelné vodivosti λ

Jde o fyzikálně tepelný parametr látky a závisí na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Je to množství tepla, které projde jednotkou času (1s) jednotkovou plochou izotermického povrchu (1m²), přičemž v látce je jednotkový teplotní gradient (1K). Toto lze vyjádřit vzorcem: **[22]**

$$\lambda = - \frac{Q}{grad\ t \cdot S \cdot \tau} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.11)$$

S ... plocha

τ ... čas

t ... teplota

Q ... množství tepla

Hodnota součinitele tepelné vodivosti se určuje experimentálně různými metodami pro každou látku (metoda laserová, metoda odporová, metoda horké desky). Pro určení je nutné znát hustotu tepelného toku, který prochází danou látkou a rozdíl teplot měřeného materiálu na dané tloušťce.

V současnosti se pro určení hodnoty součinitele tepelné vodivosti užívá moderních experimentálních měřících přístrojů. **[22]**

Naměřené hodnoty nalezneme v tabulkách, kde se udávají v závislosti na teplotě. Hodnoty jsou důležitým parametrem při matematických výpočtech a při numerické simulaci tepelných pochodů a dějů. **[22]**

Tepelná vodivost tuhých látek s rostoucí teplotou roste, kdežto u kapalin je tomu naopak. Závislost tepelné vodivosti na teplotě udává rovnice: **[21]**

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (1.12)$$

t ... teplota

λ ... tepelná vodivost při teplotě t

λ_0 ... tepelná vodivost při teplotě 0°C

α ... teplotní součinitel

U formovacích směsí závisí tepelná vodivost na tepelné vodivosti vlastního ostřiva, vzduchu a plynu v dutinách mezi zrnky. Proto je závislá na zrnitosti a druhu ostřiva, na hustotě zpěchování a samozřejmě na teplotě. Má velký vliv na rychlost prostupu tepla formovací směsí v počátečním stadiu ohřevu formy, tj. asi do 300 °C. Při teplotách nad 300 °C převládá výměna tepla prouděním a nad 600 °C sáláním. **[4]**

Tepelná kapacita

Je to množství tepla, které je potřeba odebrat nebo dodat látce, aby snížila nebo zvýšila svou teplotu o 1°C nebo 1K. [14]

Lze ji definovat vztahem: [27]

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad [J \cdot K^{-1}] \quad (1.13)$$

Q ... dodané nebo odevzdané teplo

Δt ... změna teploty

Jelikož je výhodnější stanovit kolik tepla je potřeba k ohřátí tělesa o určité známé hmotnosti, zavádí se veličina nazývaná **měrná tepelná kapacita**. Je to množství tepla, kterého je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1°C (1K). [23], [27]

Veličinu lze vyjádřit vztahem: [27]

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.14)$$

Q ... množství dodaného tepla

m ... hmotnost látky

Δt ... rozdíl teplot

Ke měření měrné tepelné kapacity se používají kalorimetry. Je to dobře tepelně izolovaná nádoba, ve které lze dodat látce určité množství tepla.

Postup měření je takový, že se nejprve určí tepelná kapacita kalorimetru dle vztahu: [24]

$$K = \frac{[m_2 \cdot (t_2 - t) - m_1 \cdot (t - t_1)] \cdot c_v}{t - t_1} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.15)$$

m_2 ... hmotnost teplejší vody

t_2 ... teplota teplejší vody

m_1 ... hmotnost studenější vody

t_1 ... teplota studenější vody

t ... teplota vody po smíchání a ustálení

c_v ... měrná tepelná kapacita vody

Potom se do kalorimetru nalije voda o určité hmotnosti a teplotě. Do vody se vloží měřená látka o známé teplotě a hmotnosti. Voda se promíchá a po ustálení se odečte teplota vody na teploměru. Mezi látkami dojde k tepelné výměně dle kalorimetrické rovnice, [24]

$$c_2 \cdot (t_2 - t) \cdot m_1 = (c_1 \cdot m_1 + K) \cdot (t - t_1) \quad (1.16)$$

ze které po její úpravě lze vypočítat měrnou tepelnou kapacitu měřené látky:

[24]

$$c_2 = \frac{(m_1 \cdot c_1 + K) \cdot (t - t_1)}{m_2 \cdot (t_2 - t)} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.17)$$

K ... tepelná kapacita kalorimetru

m_1 ... hmotnost vody

t_1 ... teplota vody

m_2 ... hmotnost měřené látky

t_2 ... teplota měřené látky

t ... teplota po promíchání a ustálení

c_1 ... měrná tepelná kapacita vody

c_2 ... měrná tepelná kapacita měřené látky

Měrná tepelná kapacita u pevných a kapalných látek mění s teplotou. U plyných látek a par je navíc závislá ještě na tlaku, objemu a podmínkách předávání tepla mezi látkami. U všech látek dochází při snižování teploty také ke snižování hodnoty měrné tepelné kapacity. Největší měrnou tepelnou kapacitu z běžně známých látek má voda ($4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Nízká měrnou tepelnou kapacitu mají kovy (např. železo $452 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), což umožňuje jejich tepelné zpracování. [27]

Tab. 1.6 Měrné tepelné kapacity některých látek [27]

látka	voda	rtuť	beton	led	ocel	měď	olovo
c [J/kg/K]	4180	140	880	2100	452	380	130

1.5.2 Vedení tepla konvekcí (prouděním)

Základem sdílení tepla prouděním je pohyb prostředí (např. proudění tekutin a jejich kontakt s okolními tuhými látkami). Při proudění tekutiny dochází zároveň ke sdílení tepla. Jestliže je teplota tekutiny vyšší než teplota pevné látky, je teplo tekutinou předáno pevné látce. Je-li teplota tekutiny nižší než pevné látky, tekutina odebere teplo z povrchu pevné látky. Ke konvekci nemusí dojít jen mezi tekutinou a pevnou látkou, ale také mezi dvěma kapalnými látkami, mezi dvěma plyny nebo mezi plynou a kapalnou látkou. Předávání tepelné energie mezi pevnou a proudící kapalnou látkou je nazýváno přestupem tepla. [21], [22]

Základem vedení tepla prouděním jsou děje odehrávající se u povrchu tuhé nebo u hladiny kapalné látky. V bezprostřední blízkosti povrchu či hladiny je předpoklad výskytu tenké nepohyblivé vrstvy, kde je teplo přenášeno pouze vedením. Dále od povrchu či hladiny se vyskytuje tzv. laminární podvrstva. Ta vyvolává podélné i příčné proudění od stěny i ke stěně spojené s promícháváním celého objemu tekutiny. Konvekce zajišťuje přenos tepla od teplosměnné plochy do objemu tekutiny, kam vyvolané proudění zasahuje.

[21]

Konvekce představuje současné vedení tepla a proudění tekutiny. Nazývá se konvekčně – kondukčním sdílením tepla. Podíl vedení a proudění je různý a záleží na druhu proudění a fyzikálních proudící kapaliny. Sdílení tepla vedením je tím menší, čím je větší pohyb molekul. [22]

Sdílení tepla prouděním je teoreticky méně propracováno, než vedení a sálání. Jeho matematický popis je velmi složitý, z důvodu výskytu mnoha proměnných. [21]

Rozeznáváme 2 druhy proudění: [21]

1. přirozené – základem je rozdíl teplot tekutin v různých částech prostoru. To má za následek rozdílné hustoty tekutin. Rozdíl hydrostatických tlaků v gravitačním poli způsobuje vertikální proudění. Chladná tekutina klesá a teplá stoupá.

2. nucené – je vyvoláno dodáním energie tekutině (např. čerpadlem). Využití je tam, kde je potřeba proudění zintenzivnit. Je-li například viskozita tekutiny příliš vysoká, její přirozená cirkulace klesá nebo úplně ustane. Pak je intenzita přestupu tepla velmi nízká.

Tyto 2 druhy konvekce probíhají společně. Podíl přirozené konvekce klesá s rostoucí rychlostí konvekce nucené. Při vysokých rychlostech je přirození konvekce zanedbatelná. [22]

Přestup tepla prouděním je definován Newtonovým zákonem ochlazování: [21]

$$dQ = \alpha \cdot (t_s - t_l) \cdot dF \cdot d\tau \quad (1.18)$$

dQ ... množství tepla

α ... součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

t_s ... teplota stěny

t_l ... teplota tekutiny

dF ... plocha

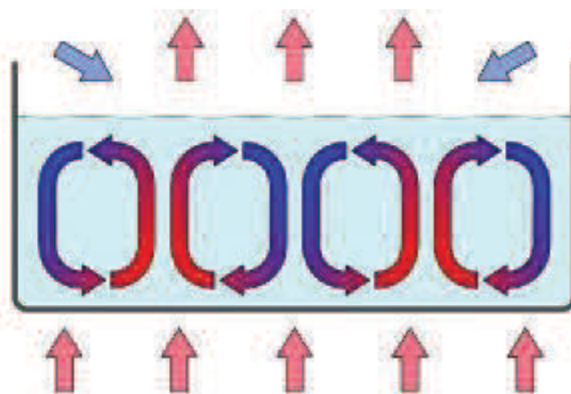
$d\tau$... čas

Při hustotě tepelného toku: [21]

$$dq = \frac{dQ}{dF \cdot d\tau} \quad (1.19)$$

Ize rovnici 1.18 přepsat do tvaru: [21]

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_l) \quad (1.20)$$



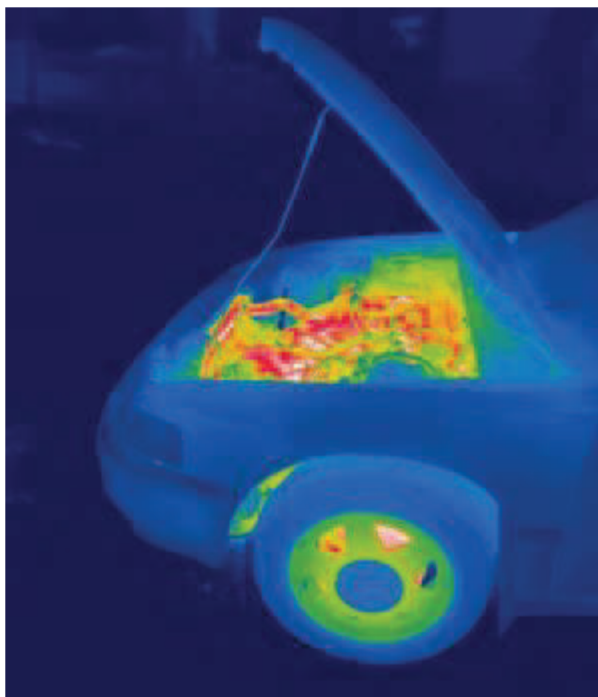
Obr. 1.24 Přirozená konvekce v gravitačním poli [28]

1.5.3 Sdílení tepla radiací (zářením)

Sálání je vznik tepelných paprsků při přeměně tepelné energie v záření. Přenos energie se v tomto případě děje pomocí elektromagnetického záření, které se šíří rychlostí světla. Toto záření se nazývá infračervené. Může být viditelné i neviditelné. Při dopadu záření na fázové rozhraní dochází k jeho absorpci, odrazu a průchodu jiným prostředím. [21], [22], [26]

Ve fyzice se zavádí pojmy absolutně černé těleso, které všechnu energii záření pohltí, a absolutně bílé těleso, které naopak všechnu energii záření odrazí. [21], [22]

Tuhá tělesa mohou absorbovat záření různých vlnových délek. Plyny naopak mohou pohlcovat jen záření v přesně vymezených vlnových délkách. U kapalin je sálání principiálně podobné jako u tuhých látek. Jako praktické využití lze uvést bilancování ztrát tepla např. z tekutého kovu. Za normálních teplot je ovšem přenos tepla sáláním zanedbatelný oproti vedení či proudění. [21], [22]



Obr. 1.25 Sálání tepla z motoru automobilu [29]

1.6 Počítačové simulace slévárenských procesů

Úkolem počítačových simulací je matematicky namodelovat procesy, které probíhají v soustavě odlitek – forma – okolní prostředí a co nejvíce je přiblížit skutečnosti. Simulace technologických slévárenských a metalurgických procesů v posledních letech značně ovlivnila rozvoj slévárenské technologie a to hlavně v oblasti predikce vad a zjištění výsledných mechanických vlastností odlitku. V současnosti lze simulovat plnění formy tekutým kovem, tuhnutí a chlazení odlitku, modelovat teplotní pole, zjišťovat výslednou mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a zbytková pnutí v odlitku. Je také kladen důraz na rychlost výpočtů a shodu výsledků simulace a skutečného stavu. **[30], [32], [33]**

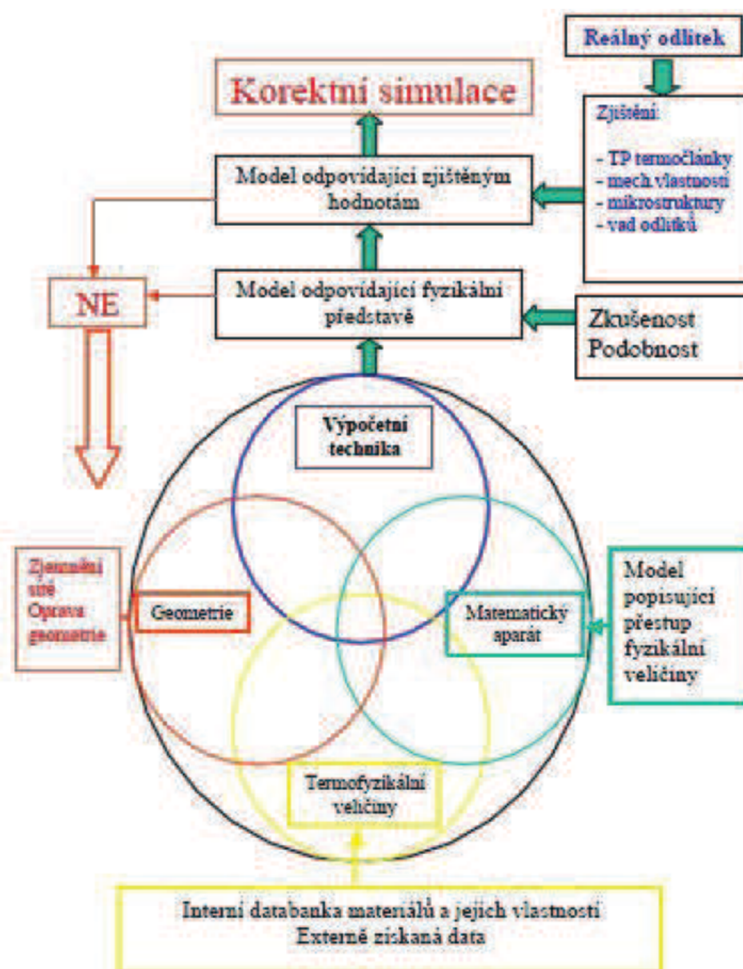
Pro účely výpočtu jsou simulační programy vybaveny řadou matematicky rozpracovaných rovnic, fyzikálních zákonů a diagramů, jako jsou např.: **[31]**

- Navier – Stokesův zákon (zákon zachování hybnosti)
- Fourierova diferenciální rovnice vedení tepla
- zákony mechaniky tuhých těles při plastické a elastické deformaci
- transformační diagramy
- strukturní diagramy

Programy obsahují také termofyzikální veličiny různých druhů odlévaných materiálů a formovacích směsí. **[32]**

Výstup z procesu simulace je model reálného děje. Jeho správnost lze hodnotit z hlediska zkušeností s podobným modelem nebo zadáním nebo porovnávat data s reálnou situací (naměřené hodnoty mechanických vlastností, měření teplotního pole termočlánky atd.) Je třeba vědět, že pravděpodobně nikdy nelze dosáhnout shody mezi simulací a skutečností. Jde tedy jen o to, jak velkého rozdílu se lze dopustit, aby byla modelovaná situace považována za korektní vůči skutečné situaci. Chyby a vlivy, které mohou modelování ovlivnit, jsou: **[32]**

- geometrie (nepřesnosti a chyby při vytváření 3D modelu např. v CADu)
- výpočetní technika
- matematický aparát (algoritmus řešící jednotlivé úkoly simulace)
- termofyzikální data



Obr. 1.26 Schéma procesu simulace

1.6.1 Postup práce při použití simulace

Postup při samotné simulaci má několik základních kroků: [33]

1. Tvorba geometrie

Před vlastní simulací je potřeba vytvořit geometrii příslušné součásti. Jde o to nakreslit součást v některém CAD systému nebo vytvořit v nějakém 3D modelačním softwaru. V některých simulačních programech jsou tyto systémy integrovány. Jindy se do nich data musí exportovat.

2. Export dat

Provádí se pomocí různých datových formátů. Datový grafický formát je soubor obsahující informace o způsobu uložení grafických údajů, jejich zobrazování a

způsobu komprimace. Jelikož v současnosti existuje mnoho datových formátů, je nutno zajistit přenos dat mezi různými produkty bez ztráty informací.

V podstatě jde o vytvoření síťového modelu součásti.

3. Zadání podmínek výpočtu

Patří sem zvolení technologie odlévání, druhu formovacího materiálu, materiálu odlitku, teploty lití, počáteční teploty formy, podmínek přestupu tepla atd.

Většina moderních simulačních programů obsahuje databáze různých materiálů odlitku i formy a jejich termofyzikálních dat. Do simulací lze ručně vkládat i data experimentálně naměřená.

4. Vlastní výpočet

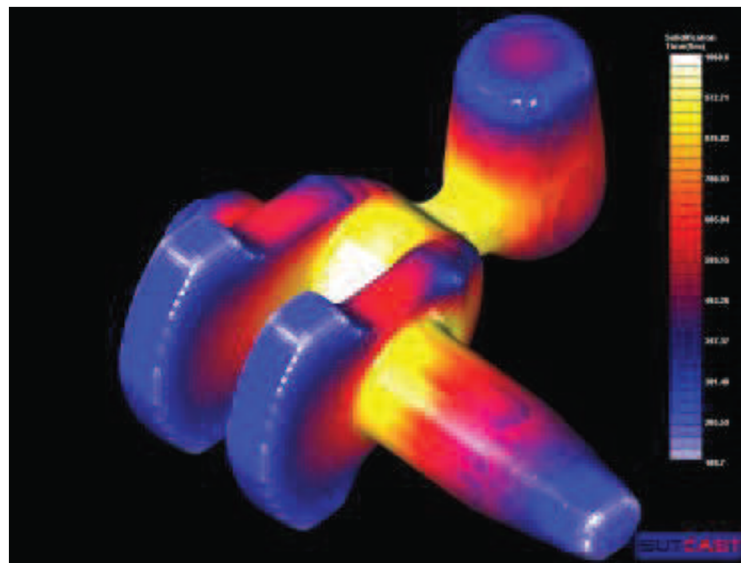
Čas, který zabere vlastní výpočet, závisí na složitosti a velikosti zadané součásti, metodě výpočtu, výkonem počítače a velikosti elementů zesíťování.

5. Prezentace výsledků

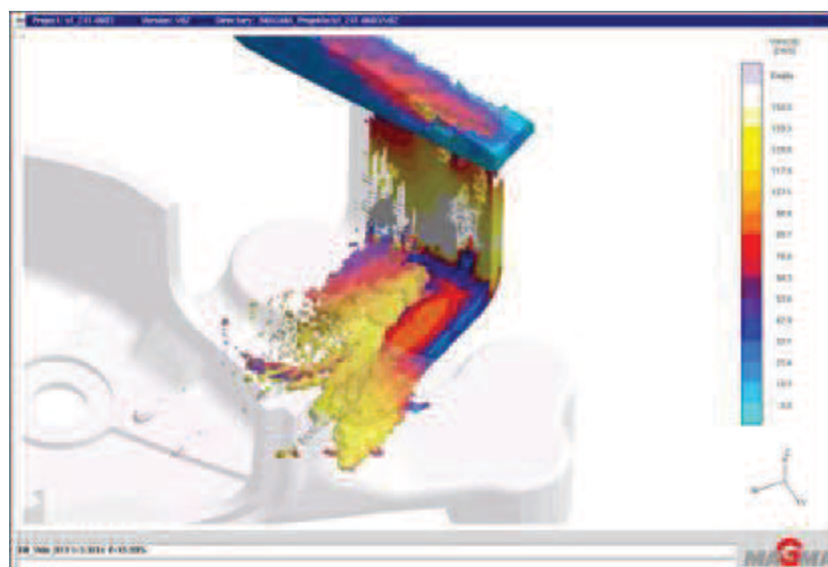
Na monitoru počítače si lze zobrazit výsledky simulace buď ve formě animace, nebo obrázků. Odlitek je možné si prohlédnout celý, v řezu v tzv. transparentním módu. Lze sledovat plnění formy tekutým kovem, teplotní pole odlitku a formy, postup tekuté fáze, čas tuhnutí, vznik staženin a jiných vad, křivky chladnutí, funkci nálitků atd. Z výsledků se usoudí, zda je kvalita odlitku vyhovující nebo je potřeba přistoupit k nějakým technologickým či konstrukčním opatřením.



Obr. 1.27 Teplotní pole odlitku [34]



Obr. 1.28 Doba tuhnutí [35]



Obr. 1.29 Rychlost plnění [36]

1.6.2 Matematické metody řešení modelu

Pro popis fyzikálních jevů se používají soustavy obyčejných nebo diferenciálních rovnic platných pro určitou oblast a aplikují se na ně vhodné počáteční a okrajové podmínky. Nalezení řešení pro tyto soustavy rovnic o mnoha neznámých je pro obyčejné matematické metody obtížné. Pro praktické využití jsou potřeba jednotlivé numerické hodnoty řešení. Počítače si s tímto

dovedou poradit, je ovšem nutné soustavy rovnic převést do algebraické formy zahrnující jen základní aritmetické operace. Metody lze tedy rozdělit na analytické a numerické. [33]

1. Analytické metody

Tyto metody mají značně omezené použití. Používají se především pro kontrolní řešení velmi jednoduchých úloh. Analytické metody používají integrální transformace a řešení se dostává ve formě matematického výrazu nebo jednoduché funkční závislosti. Přesnost je obvykle dostačující. [31], [33]

2. Numerické metody

Jejich podstata spočívá v diskretizaci proměnných. Jsou to metody uplatňující se především v počítačích, protože je pro ně typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu. Umožňují získat řešení v konečném počtu uzlů zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků a to jak v celé oblasti, tak v její povrchové části. [31], [33]

Numerické metody se dělí na: [33]

a) metoda konečných diferencí (FDM)

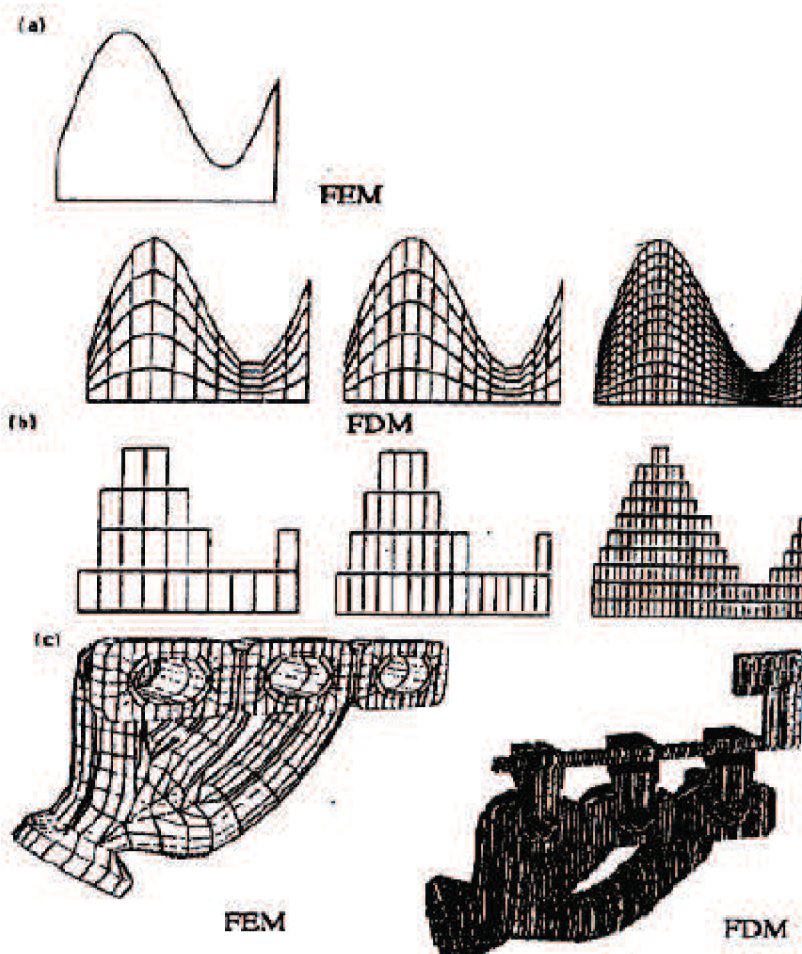
Nazývá se také jako metoda sítí a je jednou z nejpoužívanějších metod přibližného numerického řešení parciálních rovnic. Podstatou je aproximace základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenciální rovnice, která má tvar základních algebraických rovnic. Čím přesněji jsou nahrazovány derivace, tím je metoda dokonalejší. [31], [33]

b) metoda konečných prvků (FEM)

Metoda je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků. Tyto prvky jsou spolu vázány v uzlových bodech. K určení hledané závislosti se používá integrální funkcionál. Ten je představován integrálem po celé oblasti a části hranice, na které nejsou známy příslušné funkce nebo jejich derivace. [31], [33]

c) metoda okrajových prvků (BEM)

Nazývá se také jako metoda okrajových integrálních rovnic. Je založena na principu fundamentálního řešení okrajové úlohy. Dají se použít konečné prvky k aproximaci hranice oblasti a integrální rovnice pro vnitřní části. Metoda nevyžaduje diskretizaci a určování hodnot v celé oblasti, ale jen v její okrajové části. [33]



Obr. 1.30 Schéma dělení plochy u některých numerických metod [31]
(a – základní funkce, b – dělení plochy funkce, c – aplikace na odlitek)

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Zvolená ostřiva

Pro praktickou část diplomové práce bylo zvoleno několik ostřiv, u kterých se určovaly různé vlastnosti. Tyto ostřiva jsou Šajdíkovy Humence ŠH22, zirkon, chromit, kerphalite KF, olivín a dunit.

2.2 Určení sypné hmotnosti ostřiv

2.2.1 Použité pomůcky a zařízení

- sušička MORA 524
- kádinka 600 ml
- misky
- lopatka
- digitální váha Sartorius
- štětec

2.2.2 Postup měření

Ostřiva byla nejprve vysušena v sušičce při teplotě 105°C. Kádinka o objemu 600 ml byla zvážena a její hmotnost byla zaznamenána. Potom do ní bylo nasypáno 200 ml vysušeného ostřiva a kádinka i s ostřivem byla znovu zvážena a hmotnost byla zaznamenána.

Sypná hmotnost ostřiv pak byla vypočítána ze vztahu:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [kg \cdot m^{-3}], [g \cdot cm^{-3}] \quad (2.1)$$

m_2 ... hmotnost kádinky s ostřivem [g]

m_1 ... hmotnost prázdné kádinky [g]

V ... objem nasypaného ostřiva [ml]

2.2.3 Výsledky měření

Tab. 2.1 Sypná hmotnost ostřiv

ostřivo	hmotnost prázdné kádinky [g]	objem ostřiva [ml]	hmotnost kádinky s ostřivem [g]	sypná hmotnost [g/cm ³]
zirkon	199,98	200	758,9	2,79
chromit	199,98	200	768,7	2,84
kerphalite	199,98	200	548,71	1,74
olivín	199,98	200	551,11	1,76
dunit	199,98	200		
ŠH22	199,98	200	525,46	1,63

2.3 Určení měrné hmotnosti

2.3.1 Použité pomůcky a zařízení

- sušička MORA 524
- odměrný válec 1000 ml
- lopatka
- misky
- digitální váha Sartorius
- voda pH = 7,4

2.3.2 Postup měření

Vzorky ostřiv se nejprve nechají vysušit při 105°C v sušičce. Odměrný válec se přibližně do poloviny svého kalibrovaného objemu naplní vodou a hodnota se odečte ze stupnice s přesností 0,5 dílku. Zvážená dávka ostřiva se nasype do odměrného válce s vodou. Kvůli odstranění vzduchových bublin se obsah

promíchá tyčinkou. Po ustálení hladiny se odečte objem zase s přesností na 0,5 dílku.

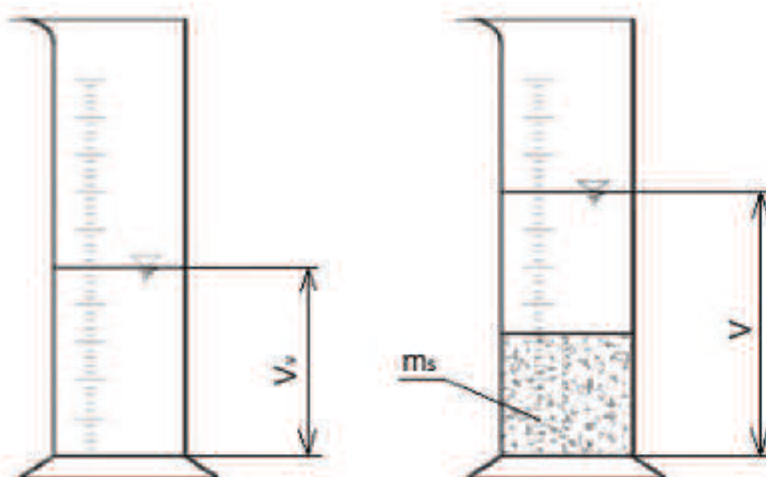
Objemová hmotnost se určí ze vztahu:

$$\rho_v = \frac{m_s}{V - V_v} \quad [kg \cdot m^{-3}], [g \cdot cm^{-3}] \quad (2.2)$$

m_s ... hmotnost ostřiva [g]

V ... objem vody s ostřivem [ml]

V_v ... objem vody [ml]



Obr. 2.1 Měření měrné hmotnosti ostřiv

2.3.3 Výsledky měření

Tab. 2.2 Měrná hmotnost ostřiv

ostřivo	objem vody [ml]	navážka ostřiva [g]	objem vody s ostřivem [ml]	měrná hmotnost [g/cm ³]
zirkon	490	507,6	608	4,30
chromit	520	502,9	640	4,19
kerphalite	525	501,19	700	2,86
olivín	523	504,3	690	3,02
dunit				
ŠH22	500	503,1	700	2,52

2.4 Stanovení vyplavitelných látek

2.4.1 Použité pomůcky a zařízení

- kádinka 600 ml
- vířivé míchadlo
- násoska
- elektrický vaříč
- digitální váha Sartorius
- sušička MORA 524
- voda pH = 7,4
- 1% roztok NaOH



Obr. 2.2 Vířivé míchadlo

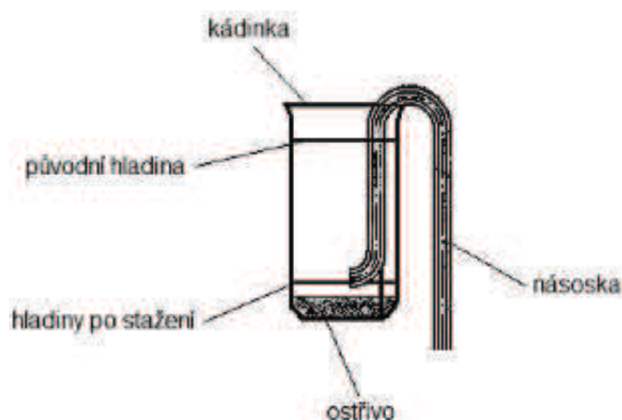
2.4.2 Postup měření

Podíl vyplavitelných látek v ostřivu byl zjištěn dle standardního pokusu pomocí normovaného plavení a sedimentace dle Stokesova zákona. Vyplavitelné látky jsou částice menší než 0,02 mm. Neusazené jemné podíly, které jsou uvolněny varem vzorku ve vodě s přísadou NaOH a mícháním vířivým míchadlem, jsou odsávány spolu s vodou nad vrstvou usazeného písku po pravidelných intervalech.



Obr. 2.3 Elektrický vaříč

Odebrané vzorky byly nejprve vysušeny v sušičce při teplotě 105°C. Potom bylo naváženo 50g z každého vzorku. Do kádinky o objemu 600 ml byl nasypán navážený vzorek ostřiva a byla dopuštěna voda do 300 ml. Po přidání 10 ml 1%-ního roztoku NaOH byl obsah povařen asi 3 až 4 minuty na elektrickém vařiči a promíchán vrtulovým míchadlem po dobu 10 minut. Kádinka pak byla dopuštěna vodou do plného objemu asi 2 cm pod okraj a po 10 minutách byla stažena pomocí speciální násosky. Kádinka byla znovu doplněna vodou a po dalších 10 minutách znovu stažena. Postup byl následně opakován po 5 minutách, dokud nebyl sloupec vody nad ostřivem čistý. Potom následovalo poslední stažení vody násoskou a vzorek byl dán do sušičky na vysušení. Po usušení a zchladnutí byl vzorek ostřiva zvážen. Rozdíl hmotností odebraného vzorku a vzorku po vysušení byl obsah vyplavitelných látek v ostřivu.



Obr. 2.4 Způsob stahování sloupce vody násoskou



Obr. 2.5 Sloupec vody nad ostřivem před prvním stažením násoskou



Obr. 2.6 Čistý sloupec vody nad ostřivem před posledním stažením

2.4.3 Výsledky měření

Tab. 2.3 Podíl vyplavitelných látek

ostřivo	hmotnost vysušeného ostřiva před plavením [g]	hmotnost vysušeného ostřiva po plavení [g]	rozdíl hmotností [g]	podíl vyplavitelných látek [%]
zirkon	50	49,98	0,02	0,04
chromit	50	49,99	0,01	0,02
kerphalite	50	49,97	0,03	0,06
olivín	50	49,78	0,22	0,44
dunit	50	49,39	0,61	1,22
ŠH22	50	49,93	0,07	0,14

[14]

2.5 Sítový rozbor

2.5.1 Použité pomůcky a zařízení

- vysívadlo s úplnou sestavou sít FRITSCH
- digitální váha Sartorius
- štětec

2.5.2 Postup měření

Vysušený a ochlazený vzorek ostřiva po vyplavení byl vysypán na sadu sít na vysívacím přístroji. Proběhlo vysívání po dobu 10 minut. Potom bylo zváženo množství ostřiva zachyceného na jednotlivých sítích. Tyto hmotnosti byly zaznamenány.



Obr. 2.7 Vysívací přístroj se sadou sít

Z navážených hodnot byla vytvořena tabulka a součtová křivka pro jednotlivá ostřiva. Byla také určena velikost zrna d_{50} , d_{25} a d_{75} .

Poměrné obsahy jednotlivých podílů ostřiva se vypočítají podle vztahu:

$$x = \frac{m_p}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

x ... procenta určitého podílu ostřiva

m_p ... hmotnost určitého podílu ostřiva [g]

m_s ... hmotnost vysušené navážky ostřiva před plavením [g]

Zrnitost ostřiva se vyjádří graficky součtovou křivkou v jednotném semilogaritmickém systému. Logaritmická stupnice je pro různé velikosti ok sít a dekadická stupnice pro procenta podílů ostřiva zachycených na sítích.

2.5.3 Výsledky měření

Šajdíkovy Humence ŠH22

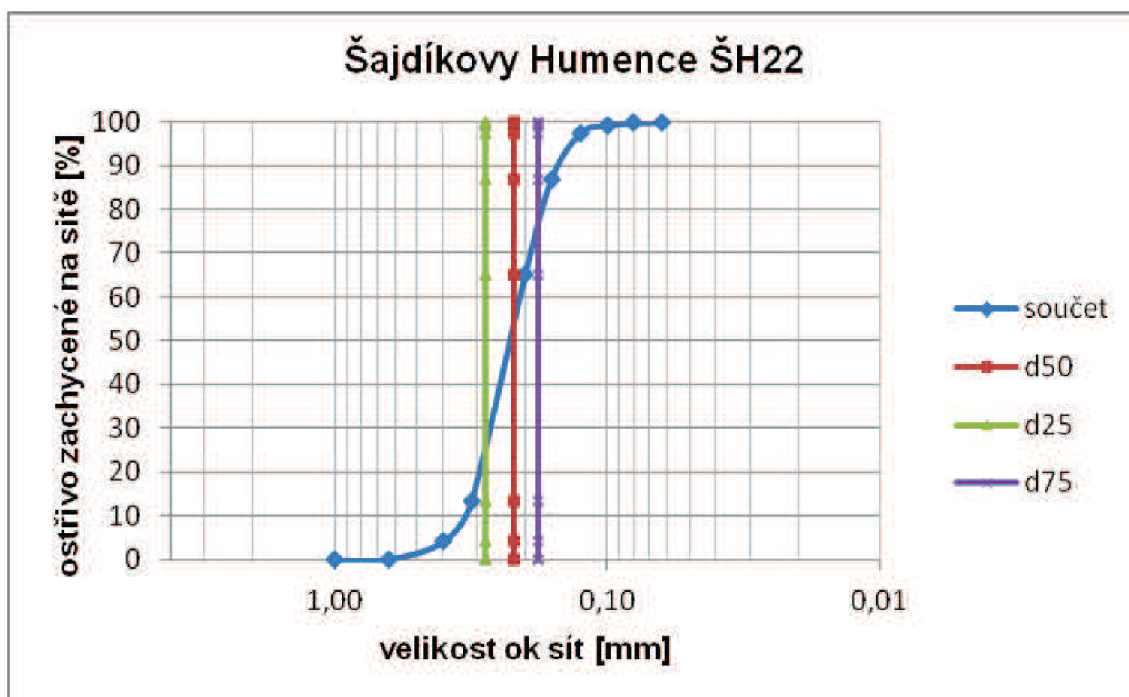
Tab. 2.4 Sítový rozbor ostřiva ŠH22

rozměr ok sítá [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0	0	0	0
0,630	0,09	0,09	0,18	0,18
0,400	1,99	2,08	3,98	4,16
0,315	4,53	6,61	9,06	13,22
0,200	25,96	32,57	51,92	65,14
0,160	10,94	43,51	21,88	87,02
0,125	5,27	48,78	10,54	97,56
0,100	0,82	49,6	1,64	99,20
0,080	0,27	49,87	0,54	99,74
0,063	0,06	49,93	0,12	100

d50 = 0,22 mm

d25 = 0,28 mm

d75 = 0,18 mm



Graf 2.1 Součtová křivka ostřiva ŠH22

Olivín

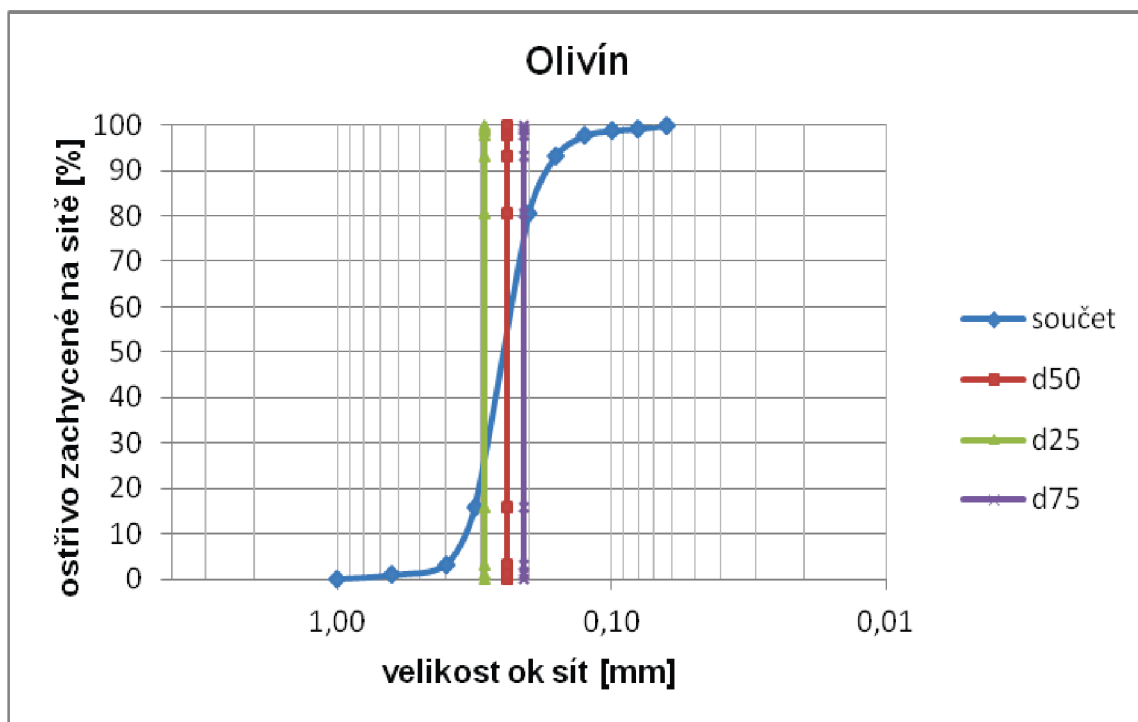
Tab. 2.5 Síťový rozbor Olivínu

rozměr ok sítu [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0,01	0,01	0,02	0,02
0,630	0,45	0,46	0,9	0,92
0,400	1,21	1,67	2,42	3,34
0,315	6,3	7,97	12,6	15,94
0,200	32,3	40,27	64,6	80,54
0,160	6,31	46,58	12,62	93,16
0,125	2,27	48,85	4,54	97,7
0,100	0,55	49,4	1,1	98,8
0,080	0,24	49,64	0,48	99,28
0,063	0,05	49,69	0,1	100

d50 = 0,24 mm

d25 = 0,29 mm

d75 = 0,21 mm



Graf 2.2 Součtová křivka ostřiva olivín

Kerphalite KF

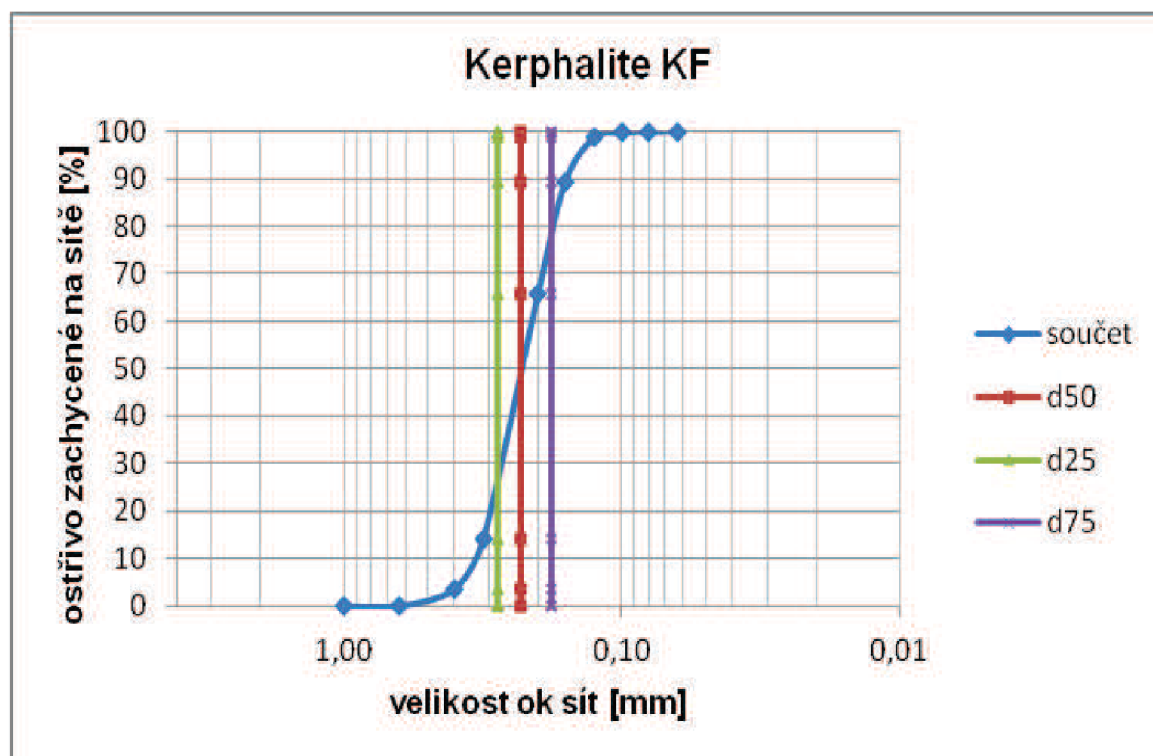
Tab. 2.6 Sítový rozbor Kerphalitu

rozměr ok sítá [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0	0	0	0
0,630	0,04	0,04	0,08	0,08
0,400	1,81	1,85	3,62	3,7
0,315	5,24	7,09	10,48	14,18
0,200	25,8	32,89	51,6	65,78
0,160	11,7	44,59	23,4	89,18
0,125	4,77	49,36	9,54	98,72
0,100	0,5	49,86	1	99,72
0,080	0,1	49,96	0,2	99,92
0,063	0,01	49,97	0,02	100

d50 = 0,23 mm

d25 = 0,28 mm

d75 = 0,18 mm



Graf 2.3 Součtová křivka ostřiva kerphalite

Chromit

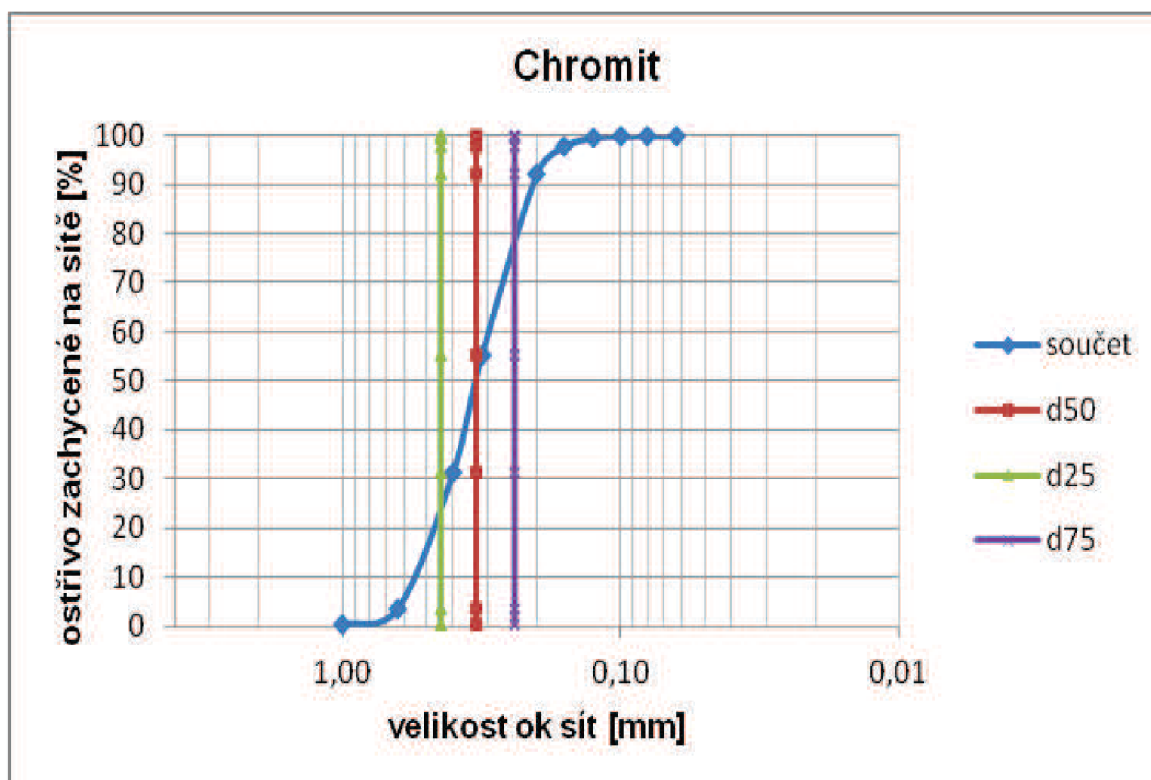
Tab. 2.7 Sítový rozbor chromitu

rozměr ok síta [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0,11	0,11	0,22	0,22
0,630	1,72	1,83	3,44	3,66
0,400	13,77	15,6	27,54	31,2
0,315	11,98	27,58	23,96	55,16
0,200	18,55	46,13	37,1	92,26
0,160	2,75	48,88	5,5	97,76
0,125	0,93	49,81	1,86	99,62
0,100	0,12	49,93	0,24	99,86
0,080	0,04	49,97	0,08	99,94
0,063	0,02	49,99	0,04	100

d50 = 0,33 mm

d25 = 0,44 mm

d75 = 0,24 mm



Graf 2.4 Součtová křivka ostřiva chromit

Dunit

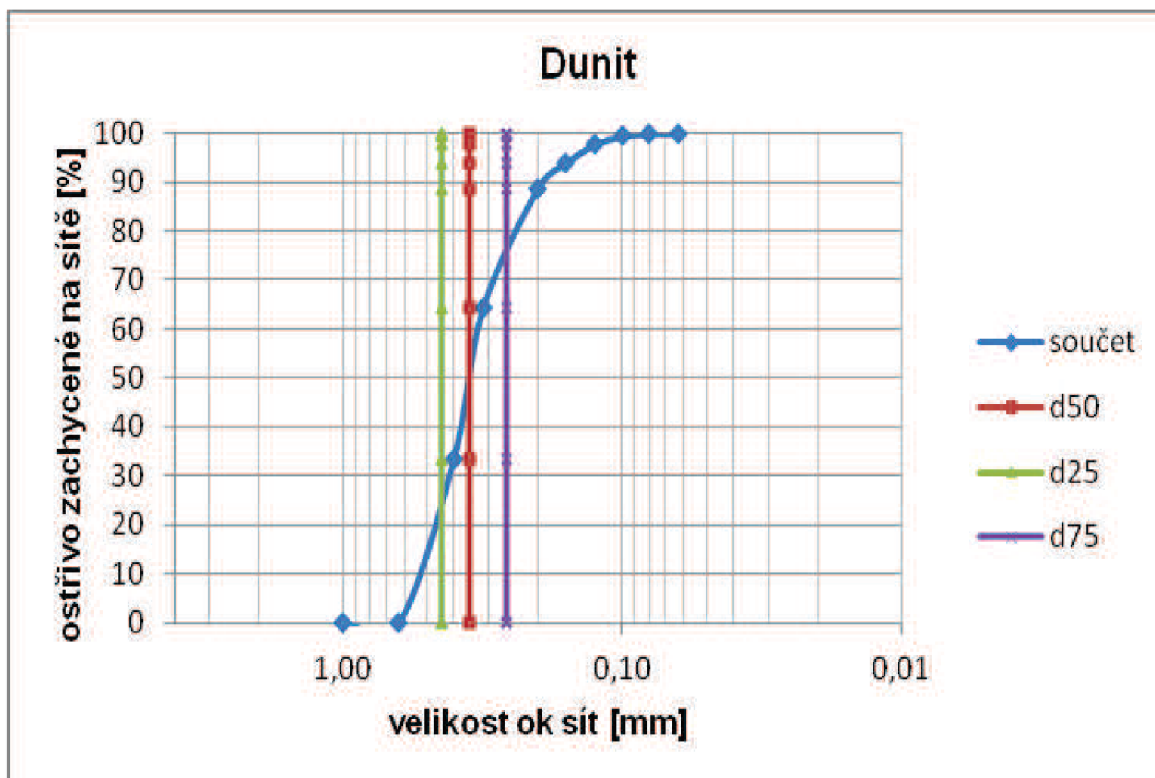
Tab. 2.8 Sítový rozbor dunitu [14]

rozměr ok síta [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0	0	0	0
0,630	0,01	0,01	0,02	0,02
0,400	16,56	16,57	33,52	33,54
0,315	15,15	31,72	30,67	64,21
0,200	12,14	43,86	24,58	88,79
0,160	2,5	46,36	5,06	93,85
0,125	1,89	48,25	3,83	97,68
0,100	0,85	49,1	1,73	99,41
0,080	0,25	49,35	0,51	99,92
0,063	0,04	49,39	0,08	100

d50 = 0,35 mm

d25 = 0,44 mm

d75 = 0,26 mm



Graf 2.5 Součtová křivka ostřiva dunit

Zirkon

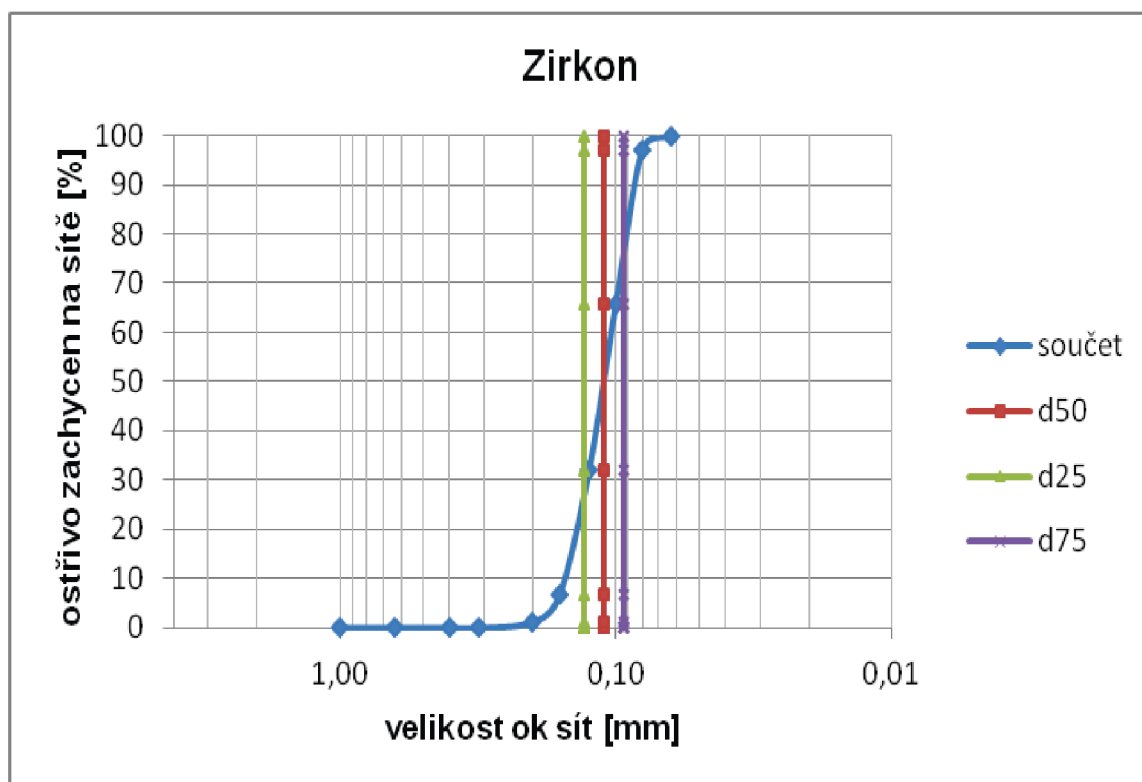
Tab. 2.9 Sítový rozbor zirkonu

rozměr ok síta [mm]	hmotnost ostřiva [g]	součet [g]	podíl ostřiva na sítu [%]	součet %
1,000	0	0	0	0
0,630	0	0	0	0
0,400	0	0	0	0
0,315	0	0	0	0
0,200	0,59	0,59	1,18	1,18
0,160	2,71	3,3	5,42	6,6
0,125	12,68	15,98	25,36	31,96
0,100	16,92	32,9	33,84	65,8
0,080	15,7	48,6	31,4	97,2
0,063	1,38	49,98	2,76	100

d50 = 0,11 mm

d25 = 0,13 mm

d75 = 0,093 mm



Graf 2.6 Součtová křivka ostřiva zirkon

2.6 Zkoušky měrné tepelné kapacity na kalorimetru

2.6.1 Měření měrné tepelné kapacity kalorimetru

1. Použité pomůcky, zařízení a materiály

- kalorimetr BMK LABORA
- odměrná nádoba
- teploměr
- voda pH = 7,4

2. Postup měření

Do kalorimetru byla nejprve nalita studenější voda o hmotnosti 1 kg. Ta se nechala ustálit a byla změřena její teplota, která byla zaznamenána. Potom byla nachystána teplejší voda o hmotnosti 0,5 kg, byla změřena a zaznamenána její teplota. Toto množství bylo nalito do kalorimetru. Obsah kalorimetru byl promíchán vrtulovým míchadlem, dokud se teplota v kalorimetru neustálila. Následně byla změřena a zaznamenána teplota ustálené vody.

Z upravené kalorimetrické rovnice byla vypočítána měrná tepelná kapacita kalorimetru:

$$K = \frac{m_2 \cdot (t_2 - t) - m_1 \cdot (t - t_1)}{t - t_1} \cdot c \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (2.3)$$

m_1 ... hmotnost studenější vody

m_2 ... hmotnost teplejší vody

t_1 ... teplota studenější vody

t_2 ... teplota teplejší vody

t ... teplota vody po ustálení v kalorimetru

c ... měrná tepelná kapacita vody ($c = 4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

3. Výsledky měření

Tab. 2.10 Hodnoty měření měrné tepelné kapacity kalorimetru

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	K [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
1000	14,8	500	45	24	591,6
1000	18,9	500	34,6	23,8	427,2
1000	14,6	500	40,6	22,7	439,4
1000	14,5	500	44,8	23,7	614,4

Střední hodnota měrné tepelné kapacity:

$$\bar{K} = \frac{591,6 + 427,2 + 439,4 + 614,4}{4} = \underline{\underline{518,5 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (K_i - \bar{K})^2} = \underline{\underline{\pm 98,54 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}}$$

Grubbsův test na hrubé chyby:

$$y_{\max} = \frac{K_{\max} - \bar{K}}{s} = \frac{614,4 - 518,15}{98,54} = 0,977$$

$$y_{\min} = \frac{\bar{K} - K_{\min}}{s} = \frac{518,15 - 427,2}{98,54} = 0,923$$

K_{\max} ... největší hodnota měření

K_{\min} ... nejmenší hodnota měření

\bar{K} ... střední hodnota měření

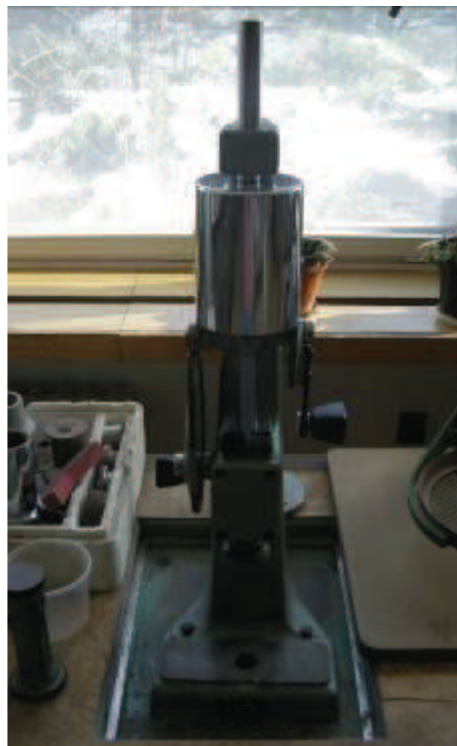
s ... směrodatná odchylka měření

Pro naměřené hodnoty muselo platit, že $y < 1,689$, což je kritická tabulková hodnota pro 95 % pravděpodobnost pro 4 měřené hodnoty. Všechny naměřené hodnoty testem prošly.

2.6.2 Měření měrné tepelné kapacity vzorků

1. Použité pomůcky, zařízení a materiály

- jednotlivá zvolená ostřiva
- mísič KITCHEN AID
- digitální váha Sartorius
- lopatka
- kádinka
- pěchovačka +GF+
- pojivo (vodní sklo Na 48 – 50)
- násypka
- lžice
- tlaková nádoba s CO₂
- odměrná nádoba
- teploměr
- kalorimetr BMK LABORA
- voda pH = 7,4
- elektrická odporová pec
- kleště



Obr. 2.8 Pěchovačka +GF+

2. Zhotovení zkušebních těles

Jako zkušební tělesa byly zvoleny válečky o průměru i výšce 50 mm. V závislosti na měrné hmotnosti jednotlivých ostřiv se hmotnost potřebná ke zhotovení válečků lišila.



Obr. 2.9 Zkušební válečky

Tab. 2.11 Navážky pro jednotlivá ostřiva na zhotovení jednoho válečku

Ostřivo	Hmotnost [g]	
ŠH 22	162	[14]
olivín	185	[14]
dunit	170	[14]
kerphalite	160	
zirkon	280	[14]
chromit	280	[14]

Postup při zhotovení válečků byl následující. Do mísiče se vysypala navážka ostřiva o určité hmotnosti. Přidalo se odpovídající množství pojiva a probíhalo mísení po dobu 3 min. Potom byly na digitální váze naváženy jednotlivé dávky ostřiv pro zhotovení válečků. Pomocí násypky byly tyto navážky nasypány do kovových forem a na pēchovačce zpēchovány.

Následovalo profouknutí směsi CO_2 s průtokem $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ po dobu jedné minuty.

Stejná zkušební tělesa byla použita pro měření tepelné akumulace ostřiv.



Obr. 2.10 Mísič Kitchen Aid

Tab. 2.12 Množství ostřiva a pojiva pro jednotlivá ostřiva

ostřivo	hmotnost [g]	pojivo [%]	pojivo [g]	
ŠH22	2000	5	100	[14]
olivín	2000	5	100	[14]
dunit	2000	7	140	[14]
kerphalite	1500	4	60	
zirkon	3000	4	120	[14]
chromit	3000	5	150	[14]

3. Postup měření

Zkušební tělesa byla nejprve přehřána na teplotu 100 °C. Tohoto bylo dosaženo žíháním válečků v elektrické odporové peci na teplotě 100 °C po dobu 2 hod.



Obr. 2.11 Elektrická odporová pec

Do kalorimetru byla nalita voda o hmotnosti 1 kg. Byla změřena její teplota, která byla zaznamenána. Potom byl do vody vložen zkušební váleček. Proběhlo promíchání vody vrtulovým míchadlem, dokud se teplota vody v kalorimetru neustálila. Z teploměru byla následně tato teplota odečtena a byla zaznamenána.



Obr. 2.12 Kalorimetr

Dále byla z kalorimetrické rovnice vypočtena měrná tepelná kapacita pro jednotlivá ostřiva.

$$c_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t) = (c_v \cdot m_1 + K) \cdot (t - t_1)$$

$$c_2 = \frac{(c_v \cdot m_1 + K) \cdot (t - t_1)}{m_2 \cdot (t_2 - t)} \quad [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (2.4)$$

c_v ... měrná tepelná kapacita vody ($c_v = 4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

m_1 ... hmotnost vody

t_1 ... teplota vody

m_2 ... hmotnost zkušebního válečku

t_2 ... teplota zkušebního válečku

t ... teplota vody v kalorimetru po ustálení

4. Výsledky měřeníŠajdíkovy Humence ŠH22

Tab. 2.13 Výsledky měření pro ŠH22 [14]

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	25,7	162	100	28,9	1312,7
1000	11,9	162	100	17	1423,6
1000	21,3	162	100	24,8	1357,5

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{c} = \frac{1312,7 + 1423,6 + 1357,5}{3} = \underline{\underline{1364,6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 55,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Olivín

Tab. 2.14 Výsledky měření pro olivín [14]

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	23	185	100	26,8	1325,9
1000	18,9	185	100	23,4	1500,4
1000	21,5	185	100	25,7	1443,7

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{c} = \frac{1325,9 + 1500,4 + 1443,7}{3} = \underline{\underline{1423,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 89 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Dunit

Tab. 2.15 Výsledky měření pro dunit [14]

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	22,4	170	100	26,3	1470,8
1000	21,6	170	100	25,4	1415,8
1000	19	170	100	23,1	1481,9

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{c} = \frac{1470,8 + 1415,8 + 1481,9}{3} = \underline{\underline{1456,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 35,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Kerphalite

Tab. 2.16 Výsledky měření pro kerphalite

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	22,1	160	100	25,6	1383,4
1000	22,4	160	100	26	1430,6
1000	14,5	160	100	18	1255,2

Střední hodnota měření:

$$\bar{c} = \frac{1383,4 + 1430,6 + 1255,2}{3} = \underline{\underline{1356,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 90,76 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Chromit

Tab. 2.17 Výsledky měření pro chromit [14]

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	16,6	280	100	20,5	827,8
1000	21,1	280	100	24,9	853,9
1000	22,3	280	100	25,7	772,2

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{c} = \frac{827,8 + 853,9 + 772,2}{3} = \underline{\underline{818,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 41,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Zirkon

Tab. 2.18 Výsledky měření pro zirkon [14]

m_1 [g]	t_1 [°C]	m_2 [g]	t_2 [°C]	t [°C]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
1000	22,2	280	100	26,8	1060,5
1000	22,5	280	100	27	1040,2
1000	20,4	280	100	25,2	1082,9

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{c} = \frac{1060,5 + 1040,2 + 1082,9}{3} = \underline{\underline{1061,2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (c_i - \bar{c})^2} = \underline{\underline{\pm 21,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Následně byly pro všechny hodnoty jednotlivých ostřiv provedeny Grubbsovy testy.

$$y_{\max} = \frac{c_{\max} - \bar{c}}{s} \qquad y_{\min} = \frac{\bar{c} - c_{\min}}{s}$$

c_{\max} ... maximální naměřená hodnota

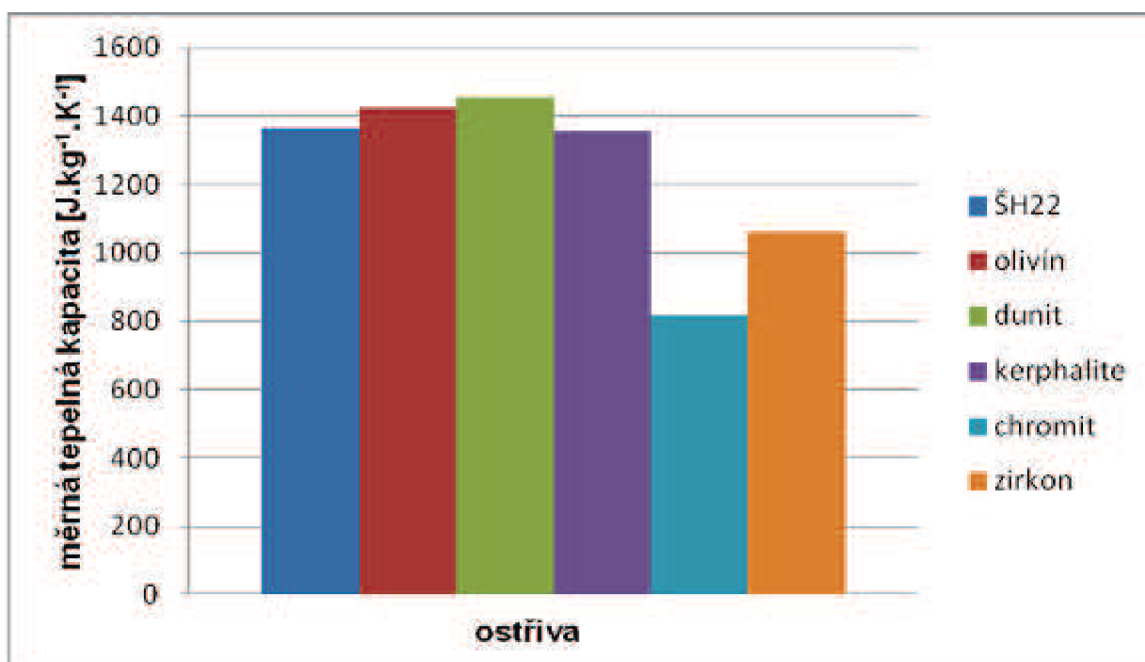
c_{\min} ... minimální naměřená hodnota

\bar{c} ... střední hodnota měření

s ... směrodatná odchylka

Pro naměřené hodnoty muselo platit $y < 1,412$, což je kritická tabulková hodnota pro 95 % pravděpodobnost pro 3 měření. Všechny hodnoty úspěšně testem prošly.

5. Vyhodnocení měření



Graf 2.7 Porovnání měrných tepelných kapacit jednotlivých ostřiv

Z grafu je patrné, že nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu má dunit. ŠH22, olivín a kerphalite jsou s ním docela srovnatelné. Zirkon a zejména chromit, což jsou ostřiva s velkou měrnou hmotností, mají měrnou tepelnou kapacitu oproti ostatním ostřivům o dost nižší.

2.7 Měření součinitele tepelné akumulace formovací směsi metodou kalorimetrickou

2.7.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály

- jednotlivá zvolená ostřiva
- ostřívo Haltern
- vodní sklo Na 48 – 50
- kovová forma na licí formu
- licí forma
- ruční pěchovačka
- mísič KITCHEN AID
- tlaková nádoba s CO₂
- pěchovačka +GF+
- násypka
- elektrická odporová pec
- tavicí kelímek
- notebook s měřícím programem
- termočlánky typu K
- vedení
- termočlánková ústředna
- měřič teploty roztavené hliníkové slitiny ALMENO OA2230 – 4S
- nátěr FMA
- rukavice
- kleště
- kalorimetr BMK LABORA
- dřevěný přípravek s azbestovým obkladem
- stopky
- voda pH = 7,4

2.7.2 Zhotovení zkušebních těles

Jako zkušební tělesa byly použity válečky stejné jako pro měření měrné tepelné kapacity. Postup zhotovení je popsán v kapitole 2.6.2.

2.7.3 Zhotovení licích forem

K tomuto měření bylo zapotřebí zhotovit licí formy. Tyto byly vyrobeny z ostřiva Haltern. Jako pojivo bylo použito vodní sklo Na 48 – 50.

Do mísiče bylo nasypáno křemenné ostřívo Haltern. Bylo přidáno 4 % vodního skla a probíhalo mísení po dobu 3 minut. Potom byly pomocí kovové formy vytvořeny licí formy. Zaformovaná směs byla vytvrzena profouknutím CO_2 .



Obr. 2.13 Připravené licí formy

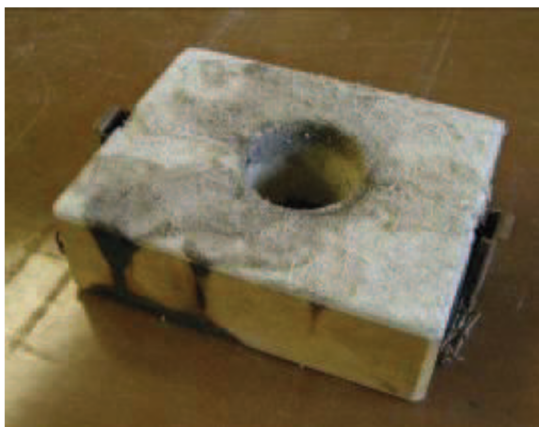
2.7.4 Postup měření

V elektrické odporové peci byla natavena hliníková slitina. Mezitím bylo připraveno stanoviště pro lití.

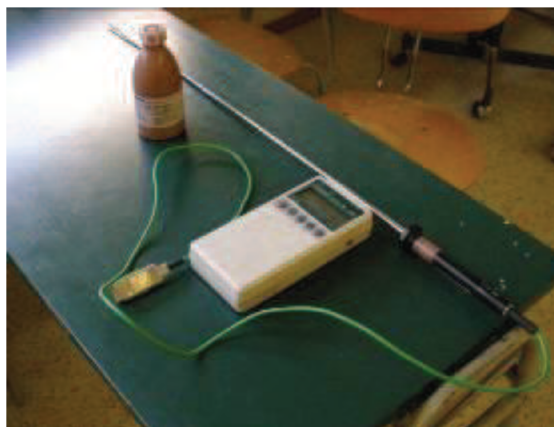


Obr. 2.14 Elektrická odporová pec

Do dřevěného přípravku s azbestovou izolací byl umístěn váleček. Na něj byla dána licí forma. Po natavení hliníkové slitiny byla pomocí měřiče teploty ALMENO změřena její licí teplota. Hrot termočlánu byl před tím natřen žáruvzdorným nátěrem.



Obr. 2.15 Dřevěný přípravek s izolací



Obr. 2.16 Měřicí přístroj Almeno

Dále bylo provedeno odlití taveniny do licí formy na zkušební vzorek (váleček). Po dobu 90s byl váleček ovlivněn roztaveným kovem. Po uplynutí doby ovlivnění byl váleček vyjmut z dřevěného přípravku a dán do kalorimetru. V něm už byla nachystána voda o hmotnosti 1 kg, jejíž teplota byla změřena pomocí termočlánu a zaznamenána. Po vložení válečku byl obsah kalorimetru promíchán vrtulovým míchadlem, dokud se teplota neustálila. Potom byla teplota změřena termočlánekem a její hodnota byla zaznamenána.



Obr. 2.17 Připravené stanoviště na lití



Obr. 2.18 Forma s nalitým kovem

Poté byl proveden výpočet koeficientu tepelné akumulace formy b_f pro jednotlivá ostřiva.

Postup výpočtu b_f

1. Výpočet tepla akumulovaného zkušebním vzorkem

$$Q_1 = (m_v \cdot c_v + v_k) \cdot (t - t_v) \quad [J] \quad (2.5)$$

m_v ... hmotnost vody

c_v ... měrná tepelná kapacita vody ($4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

v_k ... vodní hodnota kalorimetru ($126 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$)

t ... teplota vody po ustálení

t_v ... teplota vody v kalorimetru

2. Výpočet množství tepla akumulovaného dřevěným přípravkem

Je to množství tepla, které je přivedeno pouze ze strany zkušebního tělesa

přiváděním tepla Q_1 . Ostatní tepelné toky jsou vyloučeny, a proto platí

$Q_2 = f(Q_1)$. Pro zjištění tepla Q_2 byl proto sestrojen graf závislosti $Q_2 = f(Q_1)$.

Tento graf je již pro daný přípravek známý. Hodnota Q_2 se odečte z grafu 2.8.

$$Q_2 = 2 \cdot [(m_v \cdot c_v + v_k) \cdot (t - t_v) + m_p \cdot c_p \cdot (t - t_p)] \quad [J] \quad (2.6)$$

m_v ... hmotnost vody

c_v ... měrná tepelná kapacita vody ($4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

v_k ... tepelná kapacita kalorimetru ($126 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$)

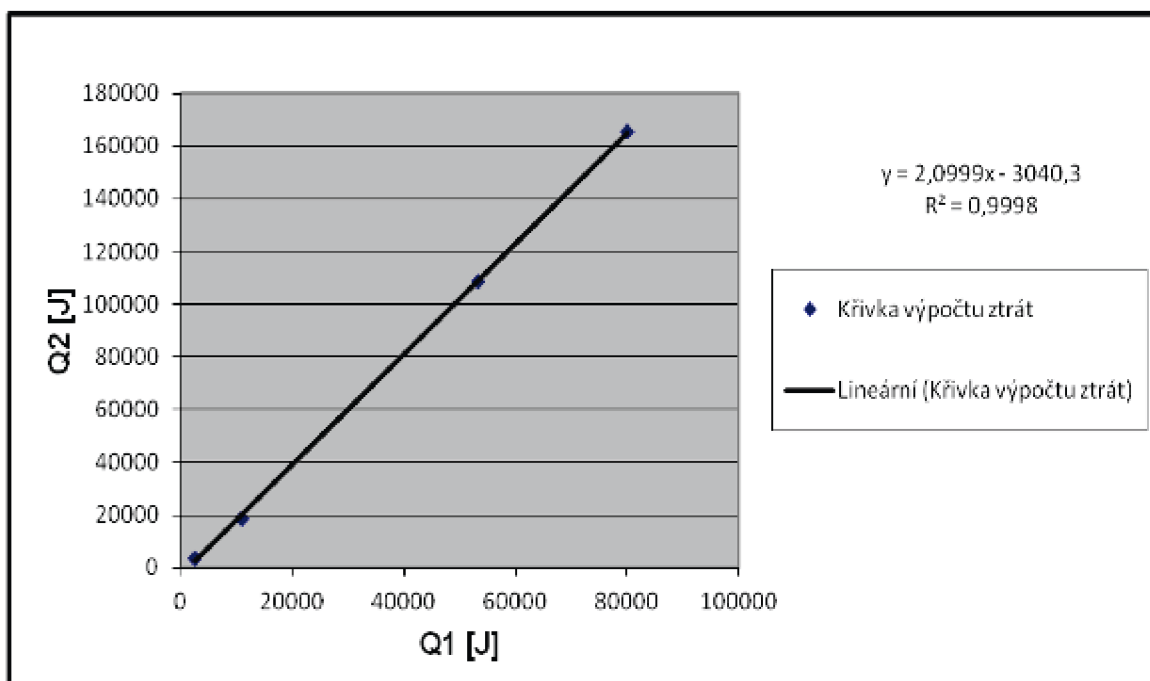
t ... ustálená teplota v kalorimetru

t_v ... teplota vody

m_p ... hmotnost poloviny dřevěného přípravku

c_p ... měrná tepelná kapacita dřevěného přípravku (azbest)

t_p ... počáteční teplota dřevěného přípravku

Graf 2.8 Závislost $Q_2 = f(Q_1)$

3. Výpočet celkového akumulovaného tepla

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [J] \quad (2.7)$$

4. Výpočet součinitele tepelné akumulace formy

$$b_f = \frac{Q}{S} \cdot \frac{1}{1,13 \cdot (t_l - t_o) \cdot \sqrt{\tau}} \quad \left[W \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (2.8)$$

S ... plocha přestupu tepla: $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} = \underline{\underline{0,001257 m^2}}$

t_l ... teplota lití

t_o ... teplota okolí

τ ... čas působení tepla kovu na vzorek (90 s)

2.7.5 Výsledky měření

ŠH22

Tab. 2.19 Výsledky měření pro ostřívo ŠH22 [14]

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1,5	21,3	751	22,6	8328,5	14441,4	1482,5
1,5	20,1	746	21,5	8969,1	15786,1	1622,8
1,5	18,8	754	20,3	9609,8	17130,9	1733,9

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{b}_f = \frac{1482,5 + 1622,8 + 1733,9}{3} = \underline{\underline{1613,1 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{f_i} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 126 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Olivín

Tab. 2.20 Výsledky měření pro ostřívo olivín [14]

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1,5	18,3	751	20,1	11531,7	21165	2128,8
1,5	20,4	746	22,1	10891,3	19820,1	2013,3
1,5	21,4	749	23,2	11531,7	21165	2133,4

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{b}_f = \frac{2128,8 + 2013,3 + 2133,4}{3} = \underline{\underline{2091,8 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{f_i} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 68,1 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Dunit

Tab. 2.21 Výsledky měření pro ostřívo dunit [14]

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1,5	13,4	745	15,5	13453,7	25199,2	2537,4
1,5	21,6	749	23,5	12172,4	22509,8	2264,2
1,5	20,3	754	22,3	12813	23854,5	2377,5

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{b}_f = \frac{2537,4 + 2264,2 + 2377,5}{3} = \underline{\underline{2393 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{fi} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 137,3 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Kerphalite

Tab. 2.22 Výsledky měření pro ostřívo kerphalite

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1	20,3	700	21,6	5606,9	8733,6	1572
1	19,5	700	21,5	8626	14073,4	2598
1	16,7	700	18,6	8194,7	14167,8	2451
1	17,5	700	19,7	9488,6	16884,8	2891
1	14,8	700	17,2	10351,2	18696,2	3184

Střední hodnota měření:

$$\bar{b}_f = \frac{1572 + 2598 + 2451 + 2891 + 3184}{5} = \underline{\underline{2539,2 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{fi} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 609,6 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Chromit

Tab. 2.23 Výsledky měření pro ostřívo chromit

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1	21,1	700	23	8194,7	14167,8	2451
1	21,8	700	23,6	7763,4	13262,1	2305
1	21,7	700	23,6	8194,7	14167,8	2455
1	18,9	700	21,1	9488,6	16884,8	2895

Střední hodnota měření:

$$\bar{b}_f = \frac{2451 + 2305 + 2455 + 2895}{4} = \underline{\underline{2526,5 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{f_i} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 255,4 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Zirkon

Tab. 2.24 Výsledky měření pro ostřívo zirkon [14]

m_v [kg]	t_v [°C]	t_i [°C]	t [°C]	Q_1 [J]	Q_2 [J]	b_f [$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$]
1,5	20,6	752	22,4	11513,7	21165	2125,9
1,5	18,6	742	20,6	12813	23854,5	2417,1
1,5	19,8	753	21,7	12172,4	22509,8	2251,9

Střední hodnota měření: [14]

$$\bar{b}_f = \frac{2125,9 + 2417,1 + 2251,9}{3} = \underline{\underline{2265 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Směrodatná odchylka: [14]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (b_{f_i} - \bar{b}_f)^2} = \underline{\underline{\pm 146 W \cdot m^{-2} \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot K^{-1}}}$$

Následně byly pro všechny hodnoty jednotlivých ostřiv provedeny Grubbsovy testy.

$$y_{\max} = \frac{b_{f,\max} - \overline{b_f}}{s} \qquad y_{\min} = \frac{\overline{b_f} - b_{f,\min}}{s}$$

$b_{f,\max}$... maximální naměřená hodnota

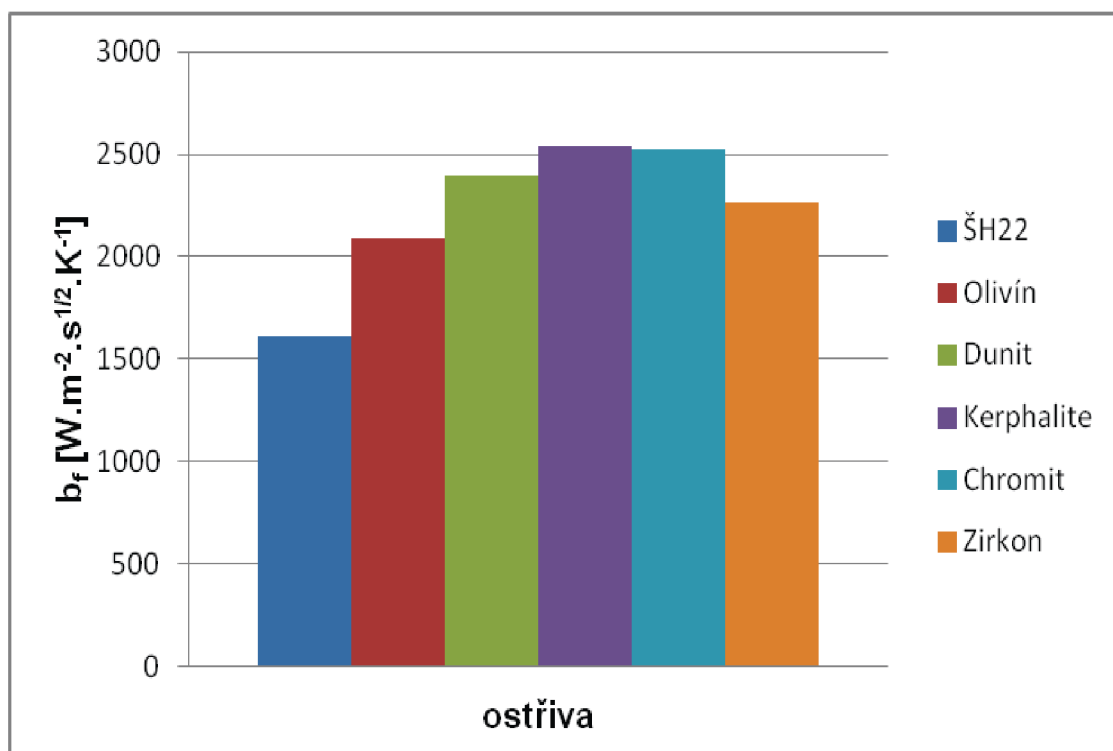
$b_{f,\min}$... minimální naměřená hodnota

$\overline{b_f}$... střední hodnota měření

s ... směrodatná odchylka

Pro měření o 3 hodnotách muselo platit $y < 1,412$, což je kritická tabulková hodnota pro 95 % pravděpodobnost pro 3 měření. Pro měření o 4 hodnotách muselo platit $y < 1,689$, což je kritická tabulková hodnota pro 95 % pravděpodobnost pro 4 měření. Pro měření o 5 hodnotách muselo platit $y < 1,869$, což je kritická tabulková hodnota pro 95 % pravděpodobnost pro 5 měření. Všechny hodnoty úspěšně testem prošly.

2.7.6 Vyhodnocení měření



Graf 2.8 Porovnání tepelné akumulace jednotlivých formovacích směr

Z výsledků měření a z grafu 2.8 vyplývá, že nejvyšší a téměř shodnou tepelnou akumulaci mají ostřiva kerphalite a chromit a to kolem 2500 $W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$. Zirkon, olivín a dunit mají tepelnou akumulaci jen o něco nižší než chromit a kerphalite, přičemž jejich hodnoty jsou v rozmezí zhruba 2000 až 2400 $W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$. Nejnižší hodnotu součinitele tepelné akumulace má křemenné ostřivo ŠH22.

2.8 Měření součinitele tepelné vodivosti

2.8.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály

- elektrická indukční pec
- formovací rámy
- termočlánky
- vedení
- notebook
- termočládková ústředna
- model
- jednotlivá ostřiva
- vodní sklo Na 48 – 50
- mísič
- tlaková lahev s CO₂
- litina

2.8.2 Příprava licích forem

Pro jednotlivá ostřiva byla připravena navážka a odpovídající množství vodního skla. Směs byla mísená po dobu 3 minut.

Do formovacích ráků o rozměrech 400x300x100 mm byl zaformován model ve tvaru kvádru o rozměrech 145x170x250 mm. Následně byly do formy vyvrtány díry pro termočlánky ve vzdálenostech 25, 50 a 75 mm od odlitku tak, aby byly v jeho ose. Do předvrtaných děr byly umístěny termočlánky a zaformovány. Potom proběhlo vytvrzení formovací směsi pomocí CO₂. Po vytvrzení byl model vyjmut z formy a ta byla převezena do slévárny k odlití.

Tab. 2.25 Navážky na formy pro měření součinitele tepelné vodivosti [14]

Ostřivo	hmotnost [g]	% pojiva	hmotnost pojiva [g]
ŠH22	26558	5	1330
olivín	30340	5	1500
dunit	27880	7	1950
chromit	45920	5	2300
zirkon	44860	4	1800

Jelikož pro tento pokus nebylo k dispozici dostatečné množství ostřiva kerphalite, nebylo pro toto ostřivo měření součinitele tepelné vodivosti provedeno.

2.8.3 Postup měření

Po převezení formy do slévárny byly termočlánky pomocí vedení připojeny do termočládkové ústředny, která byla propojena s notebookem. V notebooku byl program pro odečítání teplot z termočládků. Potom byl do formy odlit roztavený kov (litina) a byl spuštěn program na měření. Hodnoty byly odečítány po dobu 2000 s. Pak bylo odečítání zastaveno a data uložena. Z naměřených hodnot byly následně vyhotoveny grafy závislosti teploty na čase.

Jelikož v podmínkách měření na FSI VUT není k dispozici stacionární zdroj tepla, mohou být výsledky tohoto měření zkresleny. Zde byl stacionární zdroj tepla nahrazen odlitkem, který udržuje velmi dlouho vysokou teplotu a ochlazuje se velmi pomalu.

Výpočet součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl vypočítán ze vztahu:

$$\lambda = -\frac{Q}{\text{grad } t \cdot S \cdot \tau} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (2.9)$$

Q ... teplo, které prošlo formou

S ... plocha přestupu tepla

τ ... čas působení tepla (2000 s)

grad t ... teplotní spád

Za plochu přestupu tepla byla brána jedna strana odlitku (kvádru):

$$S = a \cdot b = 0,145 \cdot 0,25 = \underline{\underline{0,03625 m^2}}$$

Teplotní spád byl určen pomocí vzdálenosti příslušné stěny odlitku a okraje formy a rozdílu teplot mezi nimi:

$$\text{grad } t = \frac{t_2 - t_1}{d} = \frac{1500 - 20}{0,115} = \underline{\underline{12869,6^\circ C \cdot m^{-1}}}$$

t_1 ... teplota okolí

t_2 ... teplota odlitku

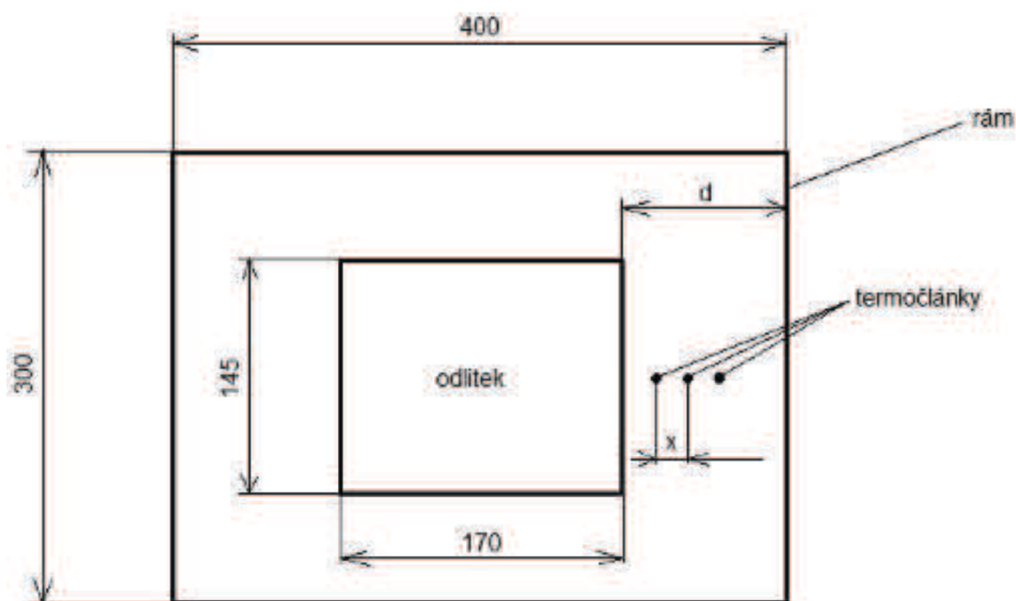
d ... vzdálenost stěny odlitku a okraje formy

Teplu, které prošlo formou, bylo určeno ze hmotnosti segmentu formovací směsi mezi dvěma termočlánky m , z měrné tepelné kapacity směsi c a rozdílu teplot mezi dvěma termočlánky Δt :

- hmotnost: $m = S \cdot x \cdot \rho$ [kg]

x ... vzdálenost mezi termočlánky (0,025 m)

- teplo: $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$ [J]



Obr. 2.19 Uspořádání lící formy v pohledu shora

Tab. 2.26 Naměřené hodnoty součinitelů tepelných vodivostí

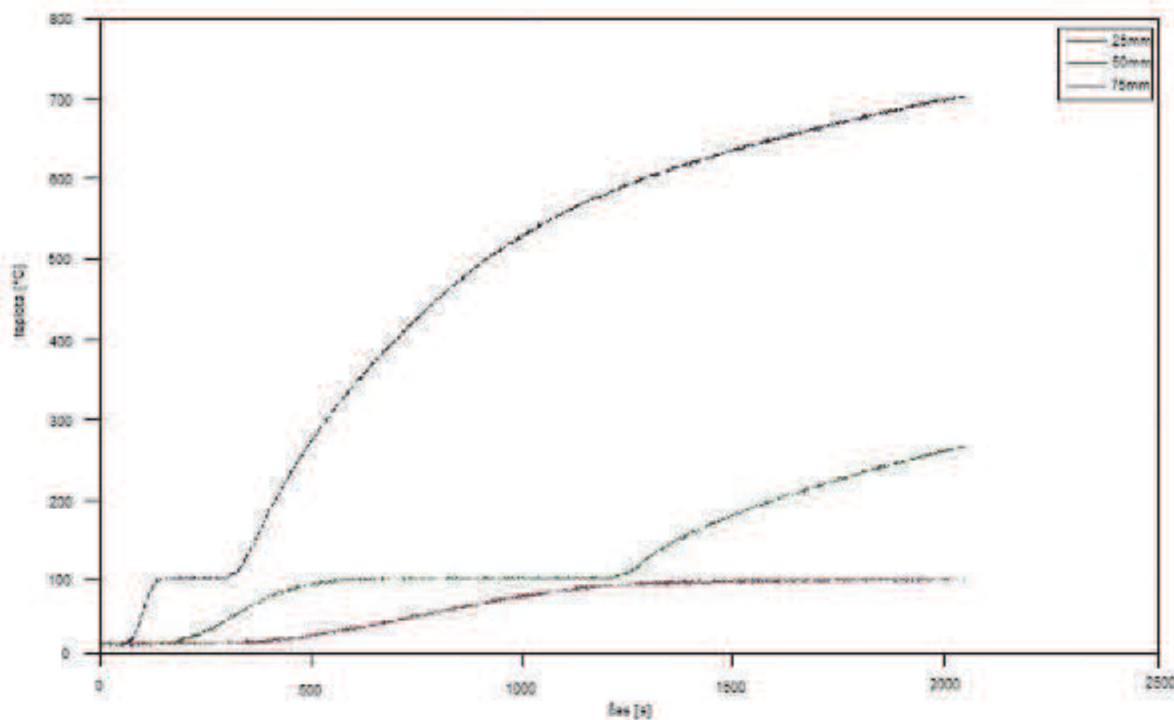
ostřivo	rozdíl teplot mezi termočlánky [°C]	m [kg]	ρ [kg.m ⁻³]	Q [J]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ŠH22	443,8	1,5	1,65	905684,4	0,97
dunit	460,1	1,57	1,73	1051456,7	1,13
olivín	328,7	1,71	1,88	798982,2	0,86
kerphalite			1,63		2,92
chromit	376,6	2,58	2,85	796271	0,85
zirkon	431	2,58	2,85	118229,4	1,27

Protože pro ostřivo kerphalite nebylo měření provedeno, jeho součinitel tepelné vodivosti byl dopočítán ze vzorce pro výpočet tepelné akumulace formy:

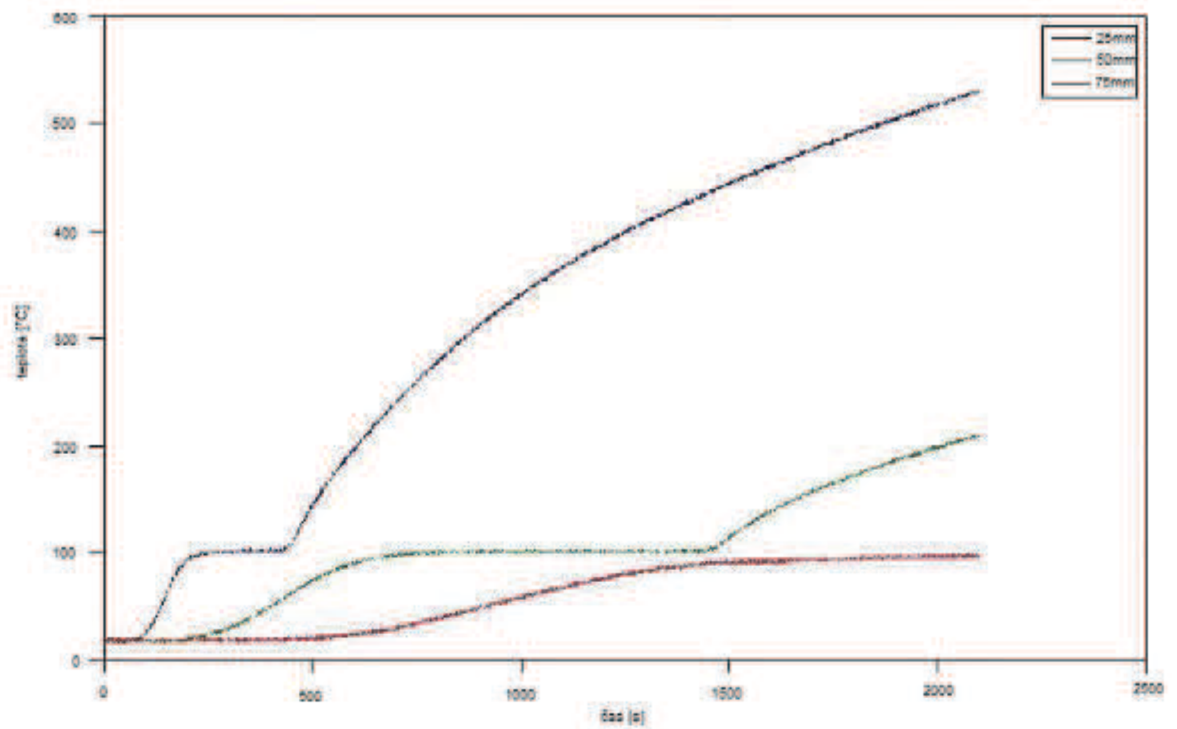
$$b_f = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \Rightarrow \lambda = \frac{b_f^2}{\rho \cdot c} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Grafické závislosti nárůstu teploty na čase u jednotlivých termočlánků pro všechna ostřiva:

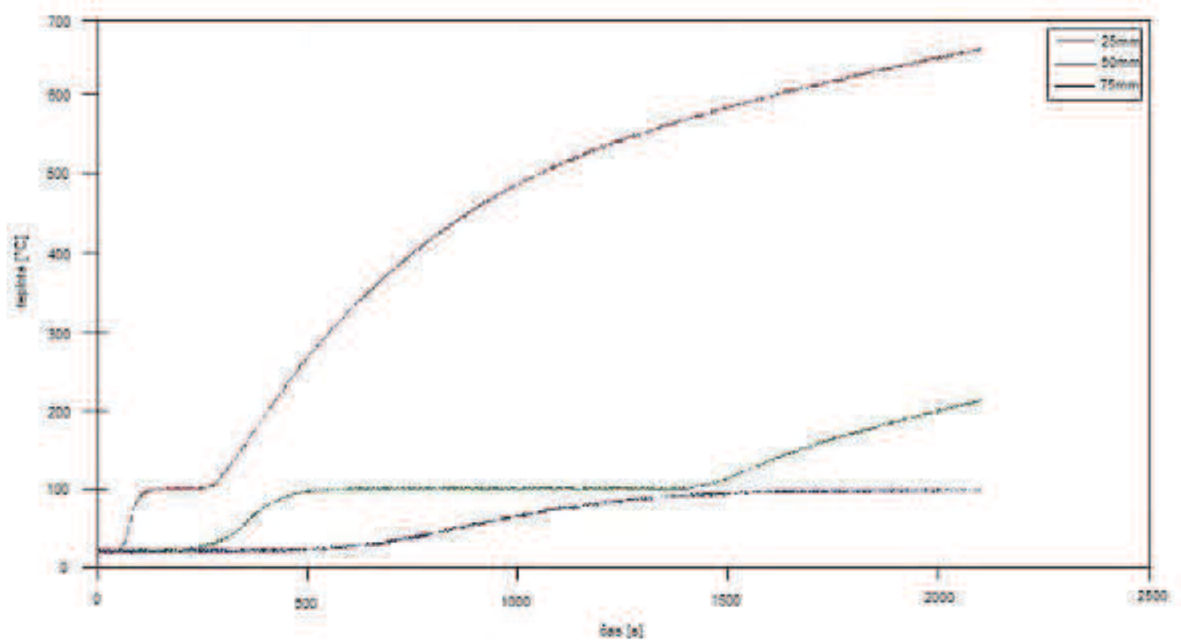
ŠH22



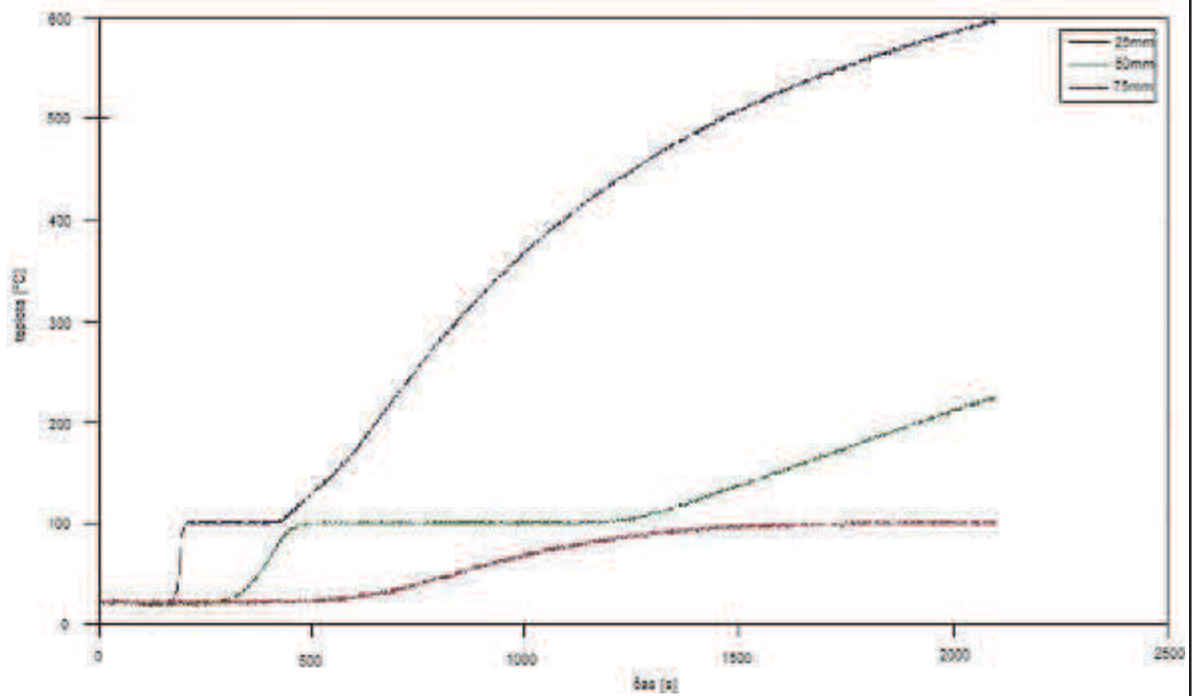
Graf 2.9 Závislost teploty na čase pro křemenné ostřivo ŠH22 [14]

Olivín

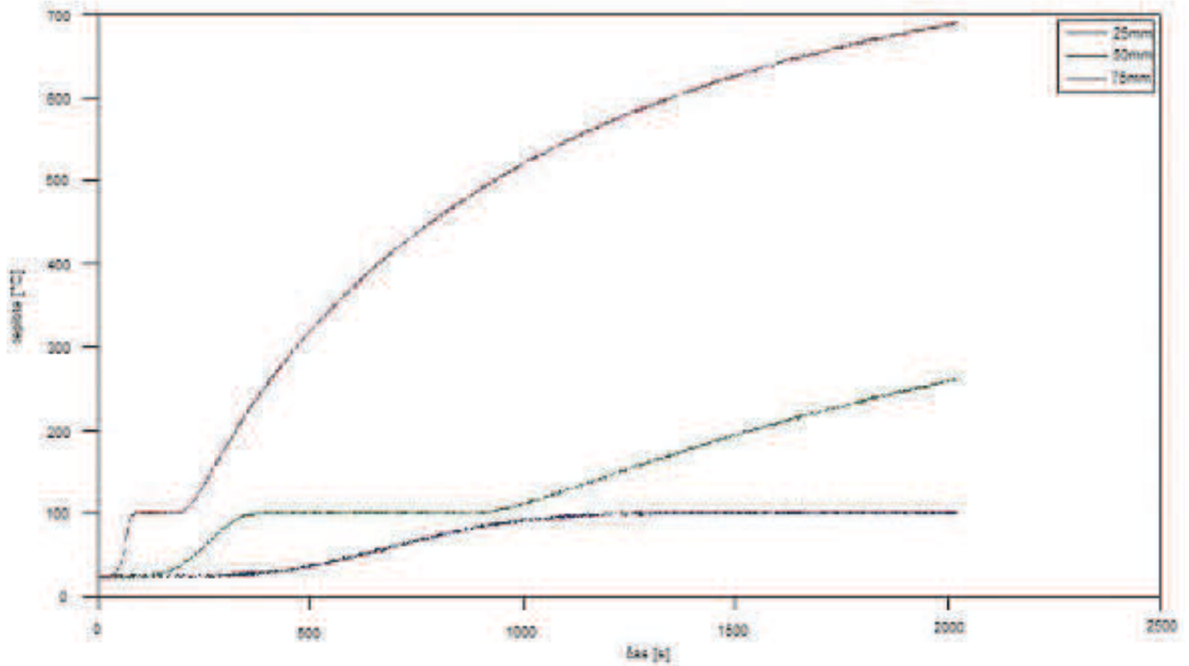
Graf 2.10 Závislost teploty na čase pro olivínové ostřívo [14]

Dunit

Graf 2.11 Závislost teploty na čase pro ostřívo dunit [14]

Chromit

Graf 2.12 Závislost teploty na čase pro chromitové ostřívo [14]

Zirkon

Graf 2.13 Závislost teploty na čase pro zirkonové ostřívo [14]

2.9 Porovnání ochlazovacích schopností formovacích směsí z jednotlivých ostřiv

Tento experiment byl proveden tak, že byly odlity zkušební vzorky a v simulačním programu QuikCAST byly provedeny simulace. V simulacích se nejprve ponechaly hodnoty vlastností ostřiv v programu již obsažené a následně se do simulací vložily hodnoty naměřené. Výsledky pak byly spolu porovnány. Zkoumala se odchylka tepelné osy od geometrické osy odlitku.

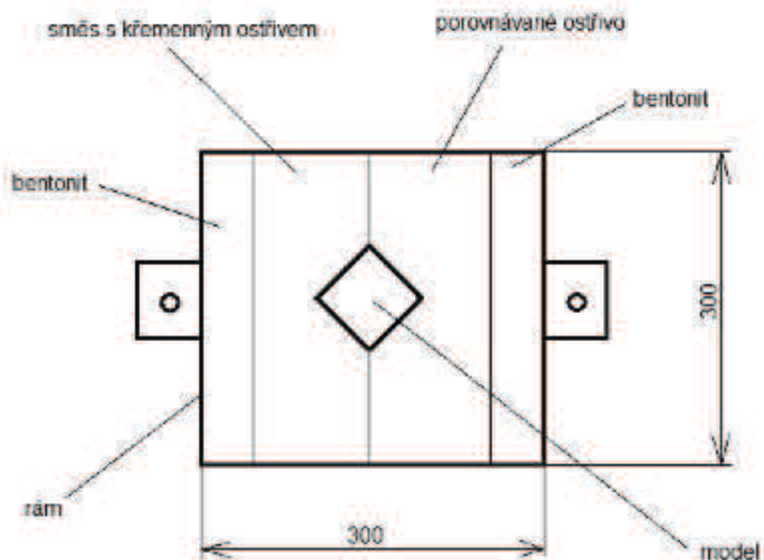
2.9.1 Použité pomůcky, zařízení a materiály

- jednotlivá ostřiva
- pojivo (vodní sklo Na 48 – 50)
- digitální váha Sartorius
- mísič Kitchen Aid
- formovací rámy 300 x 300 x 100 mm
- výplňová bentonitová směs
- dřevěný model
- tlaková lahev s CO₂
- pěchovačka
- elektrická odporová pec
- hliníková slitina
- měřič teploty roztavené hliníkové slitiny ALMENO OA2230 – 4S
- nátěr FMA
- pásová pila
- bruska a leštička
- leptadlo

2.9.2 Postup experimentu

Nejdříve byly zhotoveny licí formy a to tak, aby vždy jedna polovina modelu byla zaformována v CT směsi s křemenným ostřivem ŠH 22 a druhá polovina v CT směsi s ostřivem porovnávaným.

Jako model byl zvolen dřevěný kvádr o rozměrech 50 x 50 x 100 mm. Aby byla jednoznačně určena poloha tepelné osy odlitku, byl model vůči formě natočen o 45° (viz obr. 2.20)



Obr. 2.20 Uspořádání licí formy



Obr. 2.21 Dřevěný model

Nejprve byly naváženy dávky ostřiv, které pak byly po dobu 3 minut míseny v mísiči Kitchen Aid s určitým množstvím vodního skla.

Tab. 2.27 Hmotnost ostřiv a pojiva na zhotovení forem

ostřivo	hmotnost navážky [g]	množství pojiva [%]	hmotnost pojiva [g]
ŠH 22	20000	5	1000
olivín	4600	5	230
kerphalite	4000	4	160
dunit	4300	7	301
zirkon	7000	4	280
chromit	7000	5	350

Spodní polovina licí formy byla zhotovena z bentonitové směsi. Ta byla připravena na kolovém mísiči. Horní polovina formy pak byla zhotovena ze dvou CT směsí z porovnávaných ostřiv, které byly asi do vzdálenosti 5 cm od modelu a zbytek rámu byl vyplněn bentonitovou směsí. Jednotlivé CT směsi a bentonitová směs byly rozděleny plastovými přepážkami. Po zaformování byly tyto přepážky vytaženy a do CT směsí byly vytvořeny otvory, kterými se do formy za účelem vytvrzení foukal oxid uhličitý z tlakové lahve. Po vytvrzení byl vyjmut model. Dutina formy byla vyfoukána od zbytků směsí a formy byly přeneseny na licí pole.



Obr. 2.22 Forma na licím poli připravená k odlití

Zatímco byly zhotovovány licí formy, byla v elektrické odporové peci roztavena hliníková slitina AlSi5Cu4Zn (ČSN 42 4357). Po natavení byla pomocí měřicího přístroje odměřena teplota slitiny a bylo provedeno odlití forem. Licí teplota byla $720\text{ }^{\circ}\text{C}$.

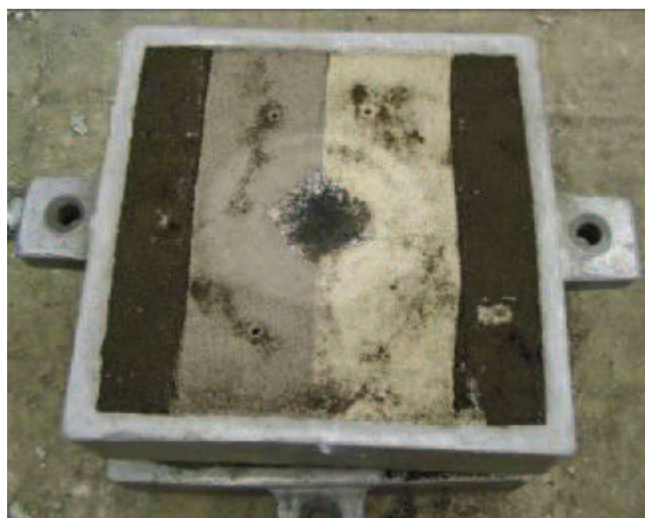


Obr. 2.23 Elektrická odporová pec



Obr. 2.24 Odlitá forma

Po ztuhnutí a vychladnutí byly odlitky vytlučeny z forem a očištěny od zbytků formovacích směsí. Na spodní straně formy přitom byla před vytlučením pěkně vidět kondenzační zóna, kde teplota formovací směsi přesáhla 100 °C a odpařila se z ní voda.

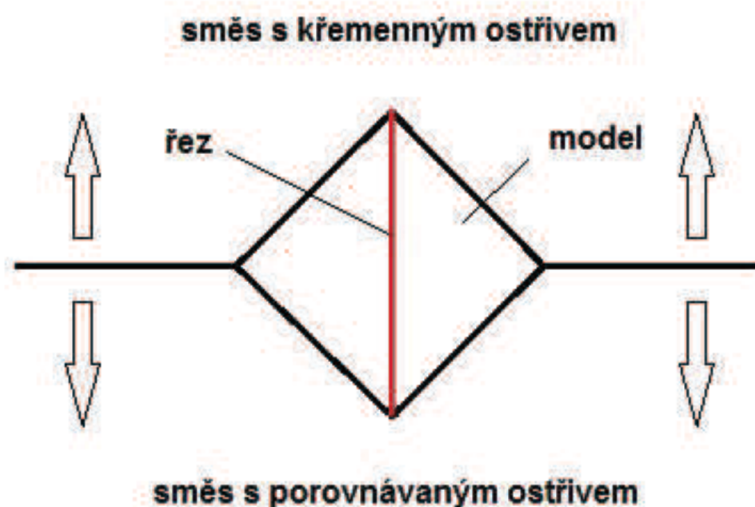


Obr. 2.25 Kondenzační zóna na spodní straně formy

Vzorky byly poté rozřezány na pásové pile ve směru kolmém na rozdělení ostřiv. Následovalo jejich broušení a leštění. Potom byly vzorky naleptány pomocí 10% - ního roztoku NaOH.



Obr. 2.26 Odlité vzorky



Obr. 2.27 Provedení řezu na vzorku

Z naleptaných vzorků se hodnotil posun tepelné osy. Tepelná osa je místo, kde se setkávají izolikvidy a kov zde tuhne jako poslední. Proto je v ní nejvyšší teplota z celého odlitku. Tepelná osa by se tedy měla vychýlit ve směru horšího odvodu tepla, tzn. na stranu ostřiva s menším odvodem tepla. Na zhotovených vzorcích nebyla bohužel tepelná osa jednoznačně určitelná pomocí růstu sloupcových zrn. Proto pro vyhodnocení a porovnání byla zvolena metoda měření vzdálenosti nejnižšího místa propadliny na vzorku k jeho geometrické ose. Tyto vzdálenosti byly odměřeny a následně porovnány s výsledky simulací.



Obr. 2.28 Rozřezaný, vyleštěný a naleptaný vzorek

2.9.3 Počítačové simulace

Postup při tvorbě simulace byl následující. Nejprve byl v programu Solid Works vytvořen model, který byl exportován do simulačního programu QuikCAST. Zde byla vygenerována objemová síť a zadány potřebné parametry pro simulaci, jako jsou materiál formy a odlitku, lící teplota, emisivita hliníkové slitiny, proudění vzduchu atd. Jako porovnávací materiál jedné poloviny formy bylo zvoleno křemenné ostřívo ŠH 22 pojené pryskyřicí.

Tab. 2.28 Hodnoty parametrů zadaných do simulací

lící teplota	720 °C
teplota okolního vzduchu	20 °C
koeficient přestupu tepla do okolí	10 W.m ² .K
emisivita slitiny	0,2

Simulace byly nejdříve provedeny s daty obsaženými přímo v simulačním programu. Pro zkoumaná ostřiva byla k dispozici pouze data k ostřivům chromit a zirkon, pojených organickou pryskyřicí. Proto byly provedeny simulace pro tyto dvě směsi. Tyto potom byly porovnány s reálnými odlitky. Tak bylo získáno porovnání schopnosti odvodu tepla formovacích směsí pojených organickým a anorganickým pojivem (vodní sklo) alespoň u dvou zkoumaných směsí.

Následně byla do simulačního programu vložena experimentálně naměřená data pro jednotlivé formovací směsi pojené vodním sklem a opět byly uskutečněny simulace.

Z výsledků simulací byly vytaženy grafy závislosti teploty na vzdálenosti. Ty byly získány provedením řezu modelu v simulaci, tak jako na skutečném vzorku (viz obr. 2.27) a vykreslením průběhu profilu teploty na konci tuhnutí na tomto řezu. Na grafu byla určena geometrická osa odlitku a pomocí nejvyšší teploty (nejvyšší bod grafu profilu teploty) byla určena osa tepelná. Vzdálenost mezi nimi byla změřena. Výsledky potom byly porovnány s experimentálně naměřenými hodnotami vzdálenosti tepelné a geometrické osy na skutečném odlitku.

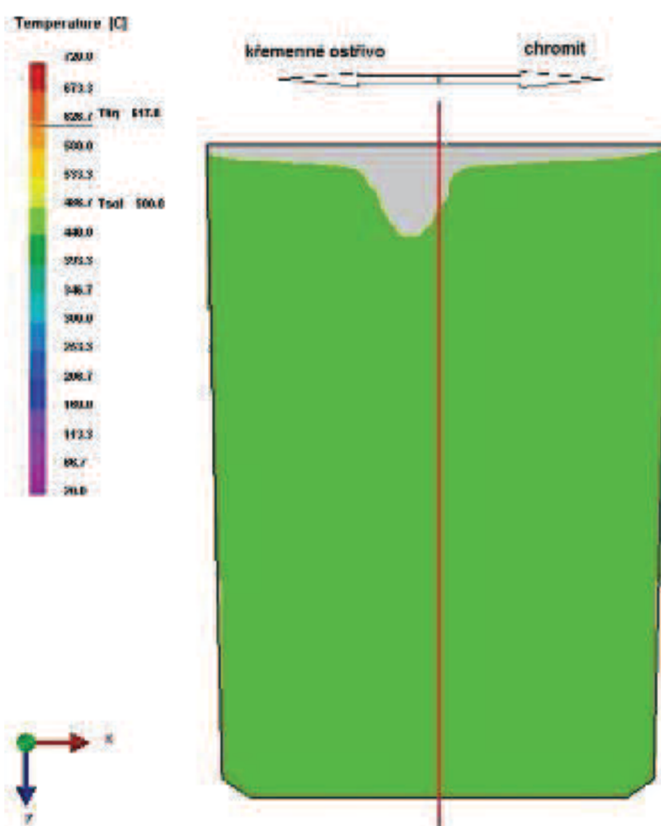
2.9.4 Zhodnocení výsledků měření

Nejprve byly porovnány výsledky simulací, kde srovnávaná ostřiva byla pojena organickým pojivem, s reálným odlitkem, kde pojivem bylo vodní sklo. Tyto ostřiva byla chromit, zirkon a křemenné ostřivo. Byla hodnocena odchylka geometrické a tepelné osy.

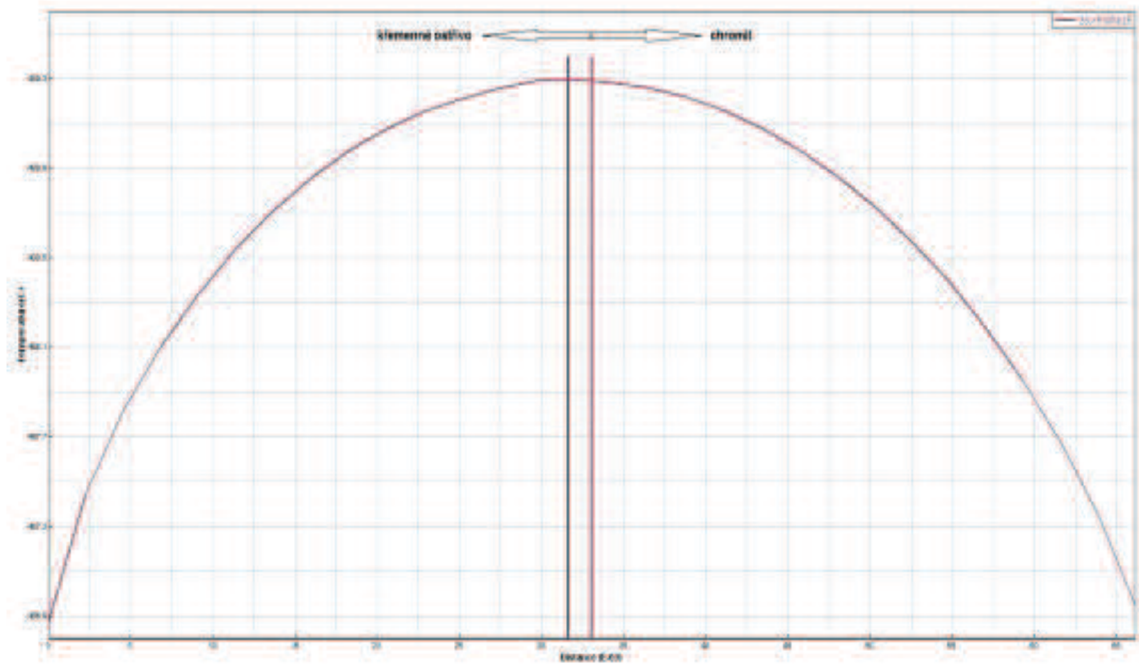
Tab. 2.29 Porovnání odchylek směsí s vodním sklem a organickým pojivem

ostřivo	odchylka v simulacích [mm]	odchylka na odlitku [mm]	rozdíl [mm]	rozdíl [%]
chromit	1,5	3	1,5	50
zirkon	1,7	3,1	1,4	45

Jako příklad vyhodnocení jsou zde uvedeny výsledky pro chromitové ostřivo. Červená čára značí geometrickou osu odlitku, modrá čára pak osu tepelnou. Výsledky pro zirkonové ostřivo jsou obsaženy v příloze.



Obr. 2.29 Řez odlitkem provedený v simulaci pro chromitovou směs



Obr. 2.30 Profil průběhu teploty v řezu pro chromitovou směs

Na odlitku je geometrická osa zobrazena černě a tepelná osa červeně.

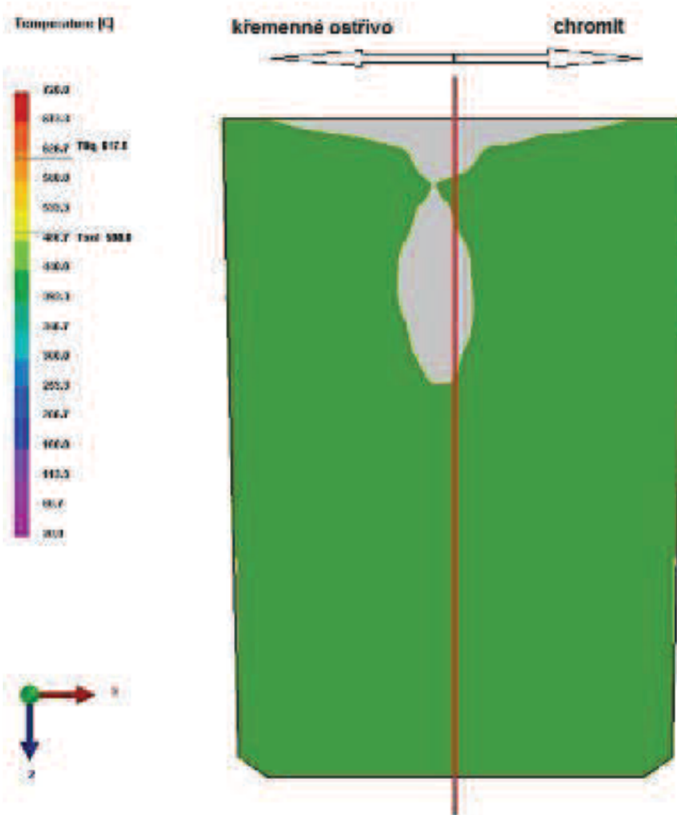


Obr. 2.31 Odlitek s vyznačenými osami

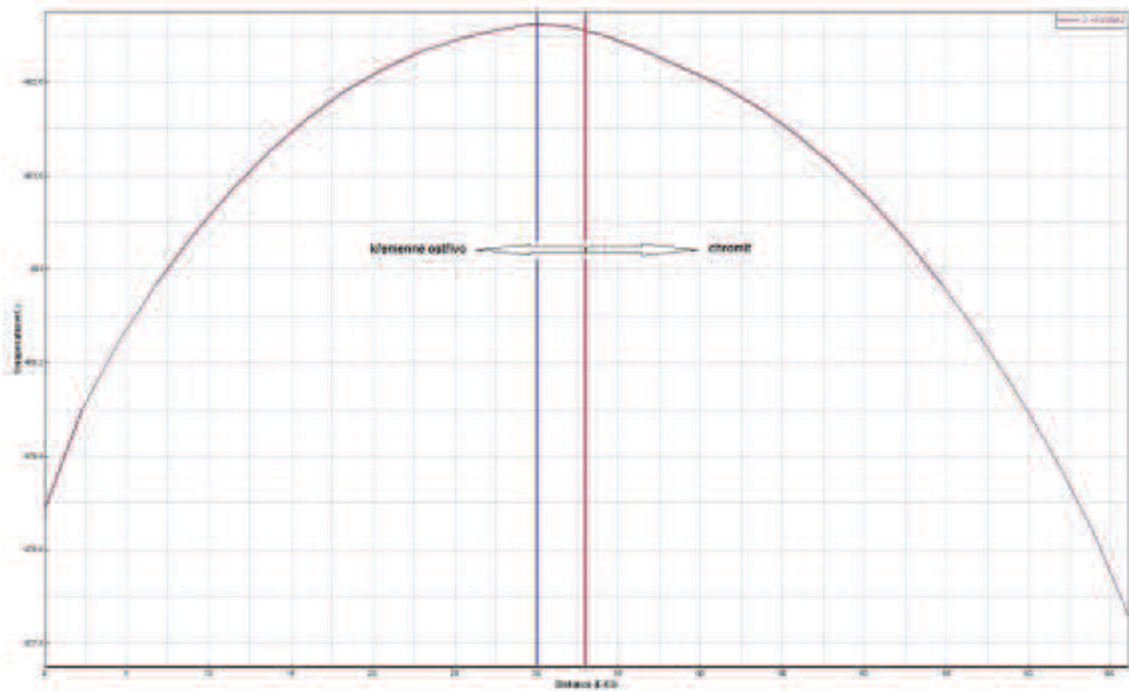
Dále je uvedeno porovnání výsledků simulace s vloženými experimentálně naměřenými hodnotami a reálného odlitku. Budou zde opět pro příklad uvedeny výsledky pro jedno vybrané ostřívo. Ostatní jsou v příloze. Vybraným ostřivem je opět chromit. Barvy čar mají stejný význam jako v předchozím případě.

Tab. 2.30 Porovnání odchylek v simulacích a na reálném odlitku

ostřívo	odchylka v simulacích [mm]	odchylka na odlitku [mm]	rozdíl [mm]	rozdíl [%]
chromit	2,8	3	0,2	6,7
zirkon	3,1	3	0,1	3,3
dunit	0,3	0,5	0,2	40
olivín	4,1	3,5	0,7	20
kerphalite	12	2	10	500



Obr. 2.32 Řez odlitkem provedený v simulaci pro chromitovou směs



Obr. 2.33 Profil průběhu teploty v řezu pro chromitovou směs



Obr. 2.34 Odlitek s vyznačenými osami

ZÁVĚR

V první části této diplomové práce byly zkoumány tepelné vlastnosti formovacích materiálů z různých druhů ostřiv s pojivovým systémem na bázi vodního skla. Některé tyto veličiny byly porovnány s hodnotami obsaženými v simulacích. Je třeba dodat, že hodnoty v simulacích jsou pro organická pojiva. Jelikož vývojáři simulačního softwaru si nepřejí zveřejňovat tyto hodnoty, nejsou zde uvedeny.

Při zjišťování měrné tepelné kapacity měl nejvyšší hodnotu dunit, těsně následován olivínem a křemenným ostřivem. Naopak nejmenší měrnou tepelnou kapacitu měl chromit a druhou nejnižší zirkon. Můžeme tedy říci, že chromitová směs se ohřívá nejrychleji. Nejpomaleji se ohřívá směs dunitová. Obecně byly hodnoty měrné tepelné kapacity vyšší, než hodnoty v simulačním softwaru a to z důvodů použití vodního skla jako pojiva. Toto pojivo totiž obsahuje větší procento vody než organická pojiva, používaná v simulaci.

Při měření součinitele tepelné akumulace vyšlo najevo, že největší jeho hodnotu má kerphalite a chromit. Jen o něco málo menší má dunit. Nejmenší hodnotu součinitele tepelné akumulace má křemenné ostřivo. Znamená to, že chromit a kerphalite do sebe dokáží pojmout nejvíce tepla.

Dalším bodem měření byl součinitel tepelné vodivosti. Výsledky tohoto experimentu však mohou být zkresleny. Jelikož na FSI VUT není k dispozici konstantní zdroj tepla, byl nahrazen odlitkem, který dlouhou dobu drží vysokou teplotu. Z důvodů nedostatku kerphalitu, nebyl pro toto ostřivo experiment uskutečněn. Měření je poměrně jednoduché a je proveditelné v podmínkách sléváren, které si tak mohou sami tento součinitel zjistit i pro jiná ostřiva, která používají. Bylo také provedeno srovnání těchto součinitelů s hodnotami v simulačním softwaru, kde byly ale hodnoty jen pro tři zkoumaná ostřiva. Byly zde určité rozdíly, které se zase dají přičíst použití rozdílného pojiva.

Jako hlavní část této práce lze považovat porovnání ochlazovacích schopností zkoumaných ostřiv. Jako první bylo provedeno srovnání ochlazovacích schopností směsí pojených vodním sklem a směsí s organickým pojivem. Byly odlity skutečné odlitky do formovacích směsí s vodním sklem a následně byly výsledky srovnány se simulací, kde byly zadány směsi sice se

stejnými ostřivy, avšak s organickým pojivem. Toto mohlo být provedeno pouze pro tři formovací směsi, protože pro ostatní v simulacích nejsou data. To lze vysvětlit tím, že nejsou tak rozšířená. Jelikož v českých slévárnách je vodní sklo jako pojivo využíváno stále ve velké míře, je toto srovnání se simulací důležité. Zjištěné rozdíly byly okolo 50 %, což je vysoká hodnota. V simulaci jsou použita, kromě bentonitové směsi, jen směsi s organickými pojivy. Lze tedy říct, že pro slévárny využívající jako pojivový systém vodní sklo, je počítačová simulace téměř nepoužitelná a nedává správné výsledky. Ve směsích s vodním sklem je totiž obsaženo větší procento vody, než v organických pojivech, proto mají lepší ochlazovací schopnost. Dá se konstatovat, že při tuhnutí odlitků ve formách vyrobených ze směsí pojených vodním sklem, je do určité doby významným ochlazovacím prvkem právě voda, obsažená ve vodním skle. Teprve po odpaření vody přechází tento úkol čistě na tepelné schopnosti ostřiva.

Nakonec byly vyhodnoceny výsledky porovnání posunu tepelných os skutečně odlitých vzorků a modelů ze simulace. V tomto případě byly do simulace vloženy experimentálně naměřená data pro formovací směsi z různých druhů ostřiv pojených vodním sklem. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 2.30. Jak je vidět, tak u většiny ostřiv jsou rozdíly značné. U kerphalitu je obrovský rozdíl způsoben tím, že pro toto ostřivo nebyl změřen součinitel tepelné vodivosti z důvodů nedostatku ostřiva, ale byl dopočítán, což mohlo vést k určitým nepřesnostem. V simulacích jsou všechny tepelné vlastnosti formovacích materiálů závislé na teplotě, avšak měřením byla z časových důvodů získána jen jedna hodnota tepelných vlastností. Toto také mohlo vést k určité chybě či odchylce. U zirkonu a chromitu jsou ale rozdíly malé, protože tyto dvě ostřiva již mají v simulacích zadané určité hodnoty tepelných vlastností a hodnoty naměřené byly dle nich přepočítány, což vedlo k dosažení závislosti těchto hodnot na teplotě. U dunitu, olivínu a kerphalitu toto nebylo možné.

Na závěr lze doporučit doměřit požadované hodnoty pro vytvoření závislosti tepelných vlastností na teplotě, aby mohly být do simulací vloženy přesnější data. U kerphalitu je pak třeba změřit součinitel tepelné vodivosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JELÍNEK, P.: *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí. Ostřiva.* Červen 2000, OFTIS Ostrava, ISBN-80-238-6118-2
- [2] CUPÁK, P. a TOMÁŠ, K. *Zkušenosti s nekřemennými ostřivy ve slévárně oceli ŠMERAL Brno, a.s. Slévárenství. 6/2006, roč. LIV, č. 6, str. 222-226.* ISSN0037-6825
- [3] SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání.* vyd. 1. Praha: SNTL, 1990, 231 s. ISBN 80-03-00400-4.
- [4] RUSÍN, Karel. *Teorie slévárenských procesů I.* 3. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 224 s. ISBN 80-214-0154-0.
- [5] RUSÍN, Karel. *Teorie slévárenských procesů II.* 3. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 97 s. ISBN 80-214-0152-4.
- [6] DAHLMAN, M.- RECKNAGEL, U. – IVANOV, S. A LUBOJACKÝ, M. Speciální písky Huttenes-Albertus pro výrobu slévárenských forem a jader. *Slévárenství. 1011/2006, roč. LIV, č.10/11, s.416-417.* ISSN 0037-6825
- [7] SEIDL, H.- DAHLMAN, M.- IVANOV, S. a KŘISTEK, J. Syntetická slévárenská ostřiva přinášejí nové možnosti. *Slévárenství. 5-6/2002, roč. L, č. 5-6, s.181-184.* ISSN 0037-6825
- [8] FRULLI, D. Use of Kerphalite KF as a foundry sand in Steel and Iron casting. In: *49. slévárenské dny: sekce formovací materiály.* Brno: Česká slévárenská společnost, 2012, str. 14 - 17. ISBN 978-80-02-02405-7.
- [9] ODLOŽIL, J. Slévárenské písky a jejich vlastnosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 44s., Vedoucí práce prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.
- [10] Ložiska nerud. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/nerudy/p%C3%ADsky.html>
- [11] Umělý korund. ABRANOVA S.R.O. [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/nerudy/p%C3%ADsky.html>
- [12] Chromitový písek. JAPTRADING S.R.O. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.jap.cz/ostatni-produkty/hutni-suroviny-a-polotovary/chromitovy-pisek/>
- [13] Olivine sand. [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://pascals-puppy.blogspot.cz/2011/03/olivine-sand.html>

[14] ŠURÁŇ, J. *Tepelné vlastnosti forem v závislosti na použitém ostřívu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.

[15] Andalusit. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.velebil.net/mineraly/andalusit>

[16] LENGHARDOVÁ, Romana. Název: Studium pojivových systémů pro technologii Warm box. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 78 s., příloh 2. Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.

[17] RUSÍN, K. Slévárenské formovací materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991. 392 s. ISBN 80-03-00278-8.

[18] ANTOŠ, Petr. Vodní sklo : výroba, struktura, vlastnosti a použití. Ústí nad Labem : Silchem : Sand team, 2002. 135 s. ISBN 80-238-9515-X.

[19] Vodní sklo. [online]. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/view.php?cisloaktuality=2009120702>

[20] Cupák, P. Anorganická slévárenská pojiva, prezentace

[21] Úvod do průmyslových technologií. UNIVERZITA JANA EVANGELISTY PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM, FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/Ktv/uc_texty/ptu/1PTU_ENVIMOD.pdf

[22] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. SDÍLENÍ TEPLA A PROUDĚNÍ. [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf

[23] Molekulová fyzika a termika - Vnitřní energie, práce, teplo - Měrná tepelná kapacita. [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: http://ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/2_Vnitrni_energie_prace_teplo/2202_Merna_tepelna_kapacita.pdf

[24] Měření měrné tepelné kapacity pevných látek. JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky. [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://mvt.ic.cz/jedna/zfm-mt/zfm-mt-11.pdf>

[25] Měrná tepelná kapacita. [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://www.frg.wz.cz/Merna%20tepelna%20kapacita.htm>

[26] UHROVÁ, Iva. Termoregulace obratlovců. [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/85326/prif_m/Diplomka.txt

- [27] Měrná tepelná kapacita. TECHMANIA. [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z:
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=323
- [28] Convection. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-10]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Convection>
- [29] NATIONAL GEOGRAPHIC. [online]. [cit. 2013-04-10]. Dostupné z:
<http://www.nationalgeographicassignment.com/html/galleries/270/tyrone-turner/thermal/3>
- [30] NOVÁ, Iva, Petr KOSEK a Jan ŠMRHA. Slévárenské simulační programy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 11 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy.html>
- [31] MICHNA, Štefan. Počítačové simulační programy pro odlévání materiálu jako moderní nástroj pro získání kvalitních odlitků. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/pocitacove_simulacni_programy.pdf
- [32] PAVEL, Boucník. *Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitku* [online]. Brno, 2001 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://www.boucnik.cz/PDF_disertacka/kap12.pdf. Disertační práce. Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojního inženýrství.
- [33] ŠMÍD, Ondřej. *Podpora technologie výroby odlitků s využitím numerické simulace*. Brno, 2004. Diplomová práce. Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [34] HEUNISCH - GUSS. [online]. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z:
<http://www.heunisch-guss.com/typo3temp/pics/01eb40c2a6.jpg>
- [35] SUTCAST. [online]. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z:
http://www.sutcast.com/Libraries/Events_2010/local_solidificatin_time.sflb.ashx
- [36] Classguss. [online]. [cit. 2013-04-13]. Dostupné z:
http://www.claasguss.de/picts/2_simulation.jpg

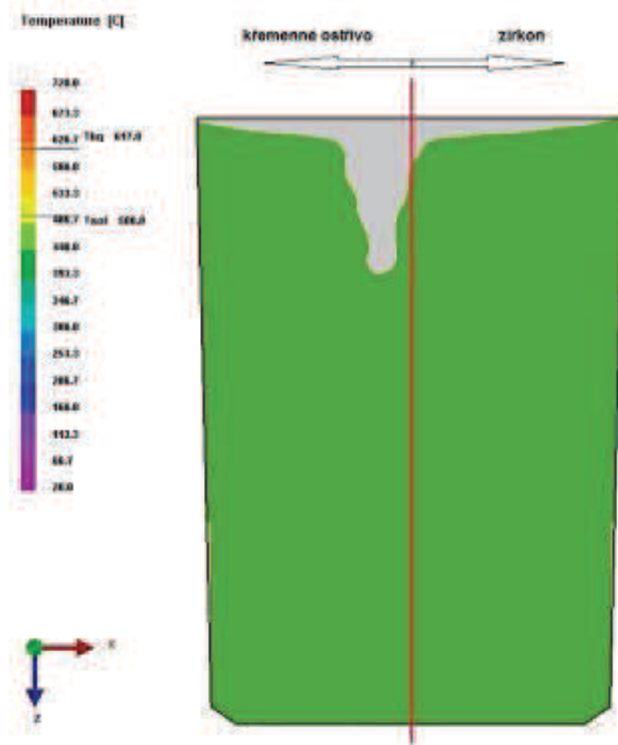
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
LLG		litina s lupínkovým grafitem
LKG		litina s kuličkovým grafitem
ST		samotuhnoucí směs
CT		chemicky vytvrzená směs
CB		cold box (studený jaderník)
m		modul vodního skla
CO ₂		oxid uhličitý
CAD		computer aided design (počítačové projektování)
3D		trojrozměrný systém
d50	mm	střední velikost zrna ostřiva
d25	mm	velikost ok síta, kde se zachytilo 25% ostřiva
d75	mm	velikost ok síta, kde se zachytilo 75% ostřiva
ŠH22		křemenné ostřivo Šajdíkovy Humence
NaOH		hydroxid sodný

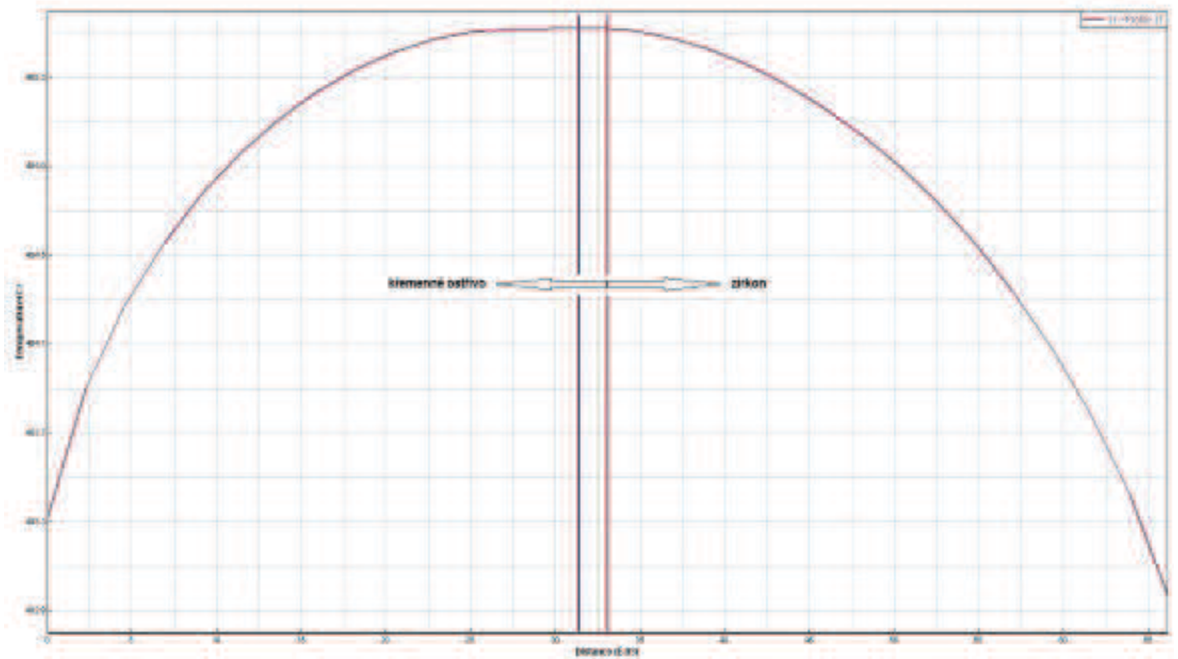
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výsledky porovnání organického a anorganického pojiva
- Příloha 2 Výsledky porovnání skutečného odlitku s výsledky simulací
- Příloha 3 Materiálový list ostřiva zirkon
- Příloha 4 Materiálový list ostřiva chromit
- Příloha 5 Materiálový list ostřiva olivín
- Příloha 6 Materiálový list ostřiva kerphalite KF

Příloha 1



Obr. P1.1 Řez odlítkem provedený v simulaci pro zirkonovou směs

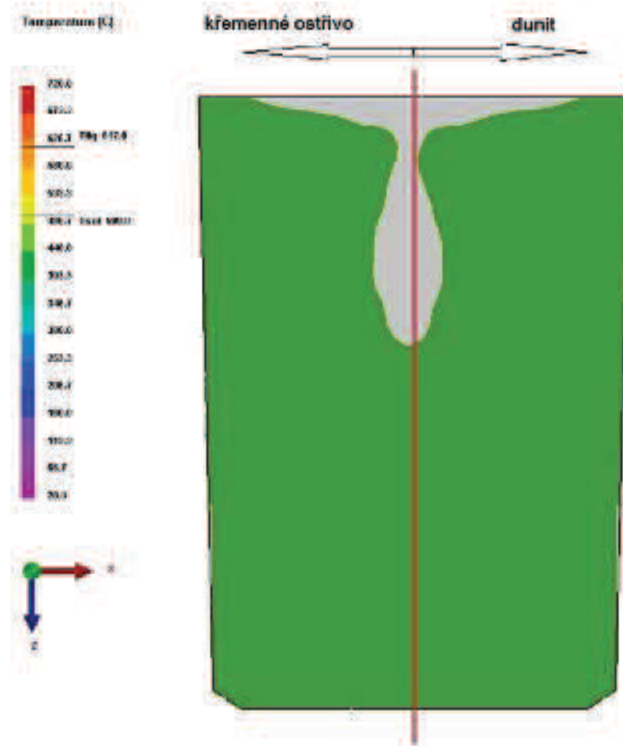


Obr. P1.2 Profil průběhu teploty v řezu pro zirkonovou směs

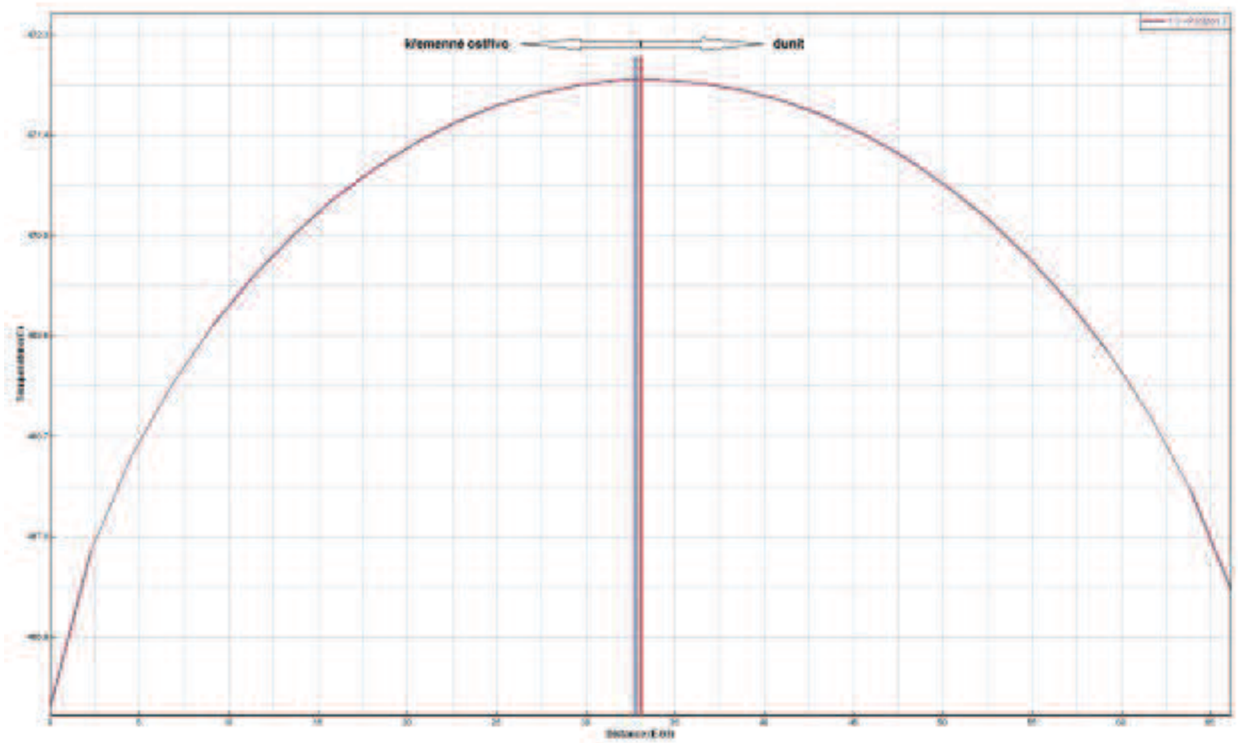


Obr. P1.3 Řez reálného odlitku s vyznačenými osami (zirkon)

Příloha 2



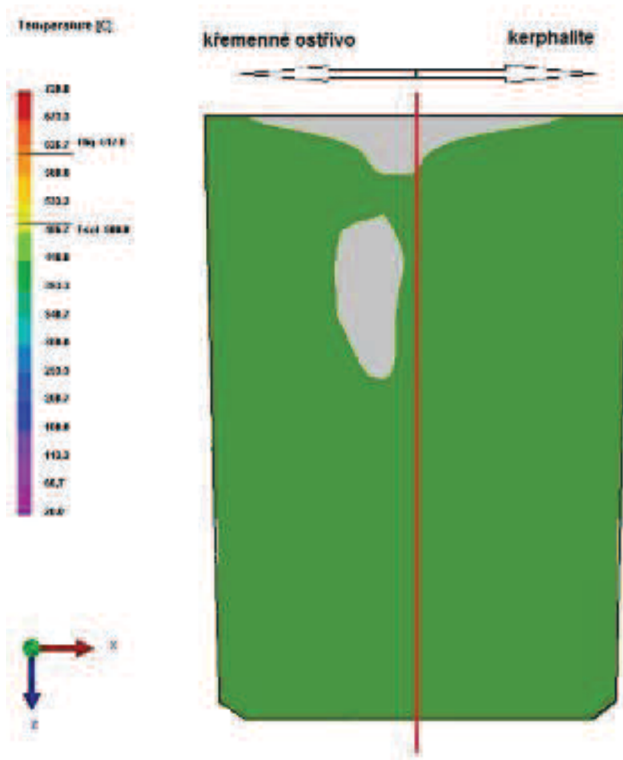
Obr. P2.1 Řez odlitkem provedený v simulaci pro dunitovou směs



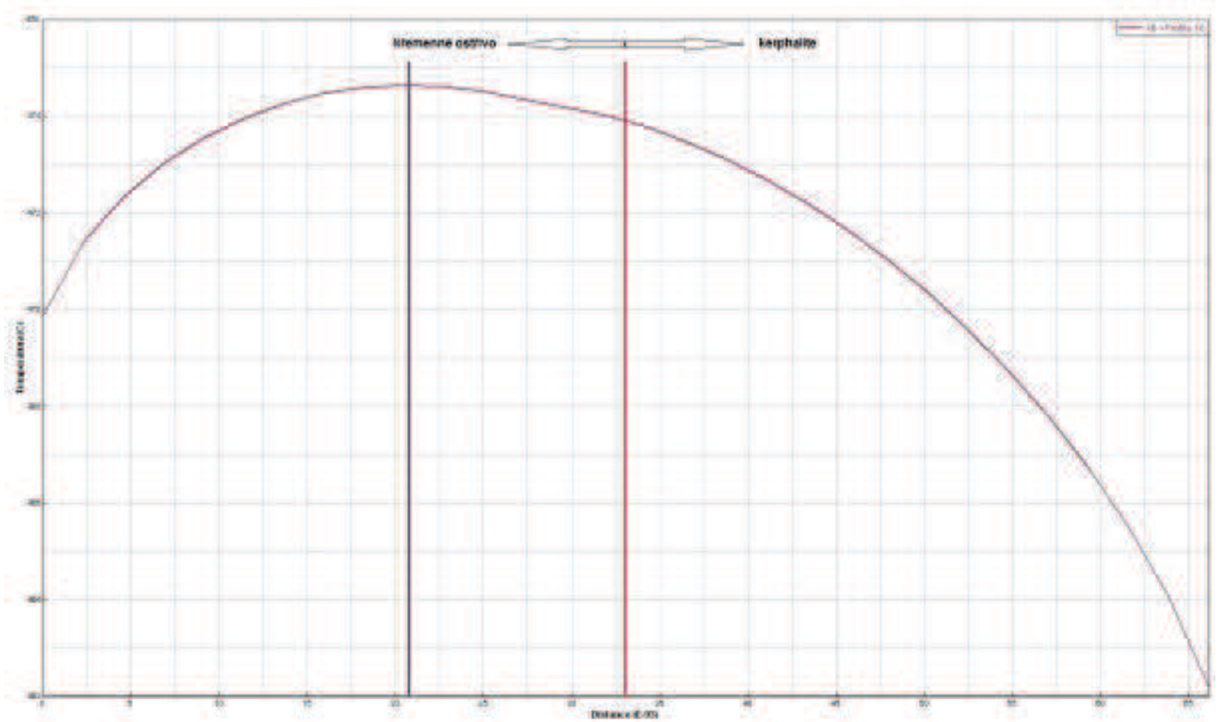
Obr. P2.2 Profil průběhu teploty v řezu pro dunitovou směs



Obr. P2.3 Řez reálného odlitku s vyznačenými osami (dunit)



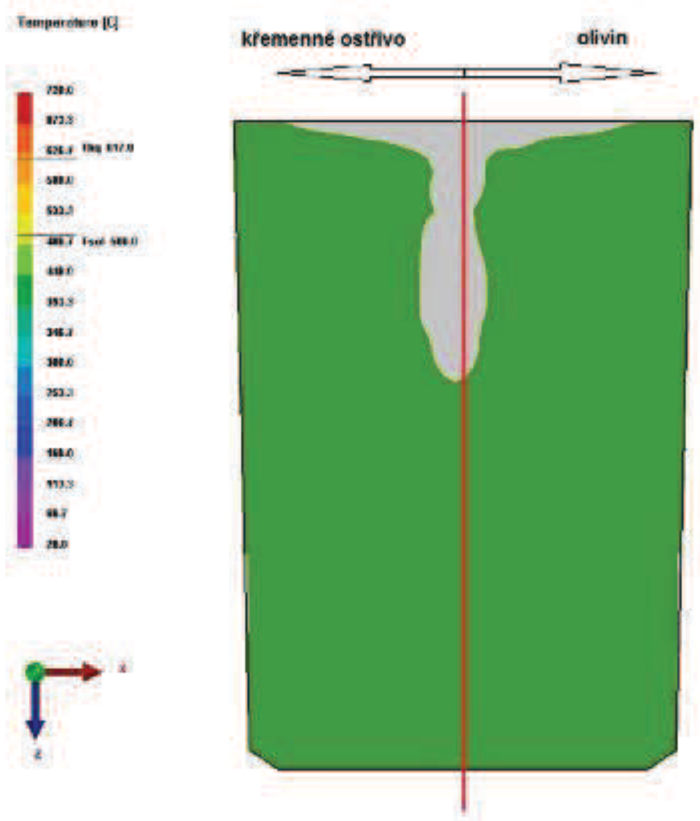
Obr. P2.4 Řez provedený v simulaci pro směs s kerphalitem



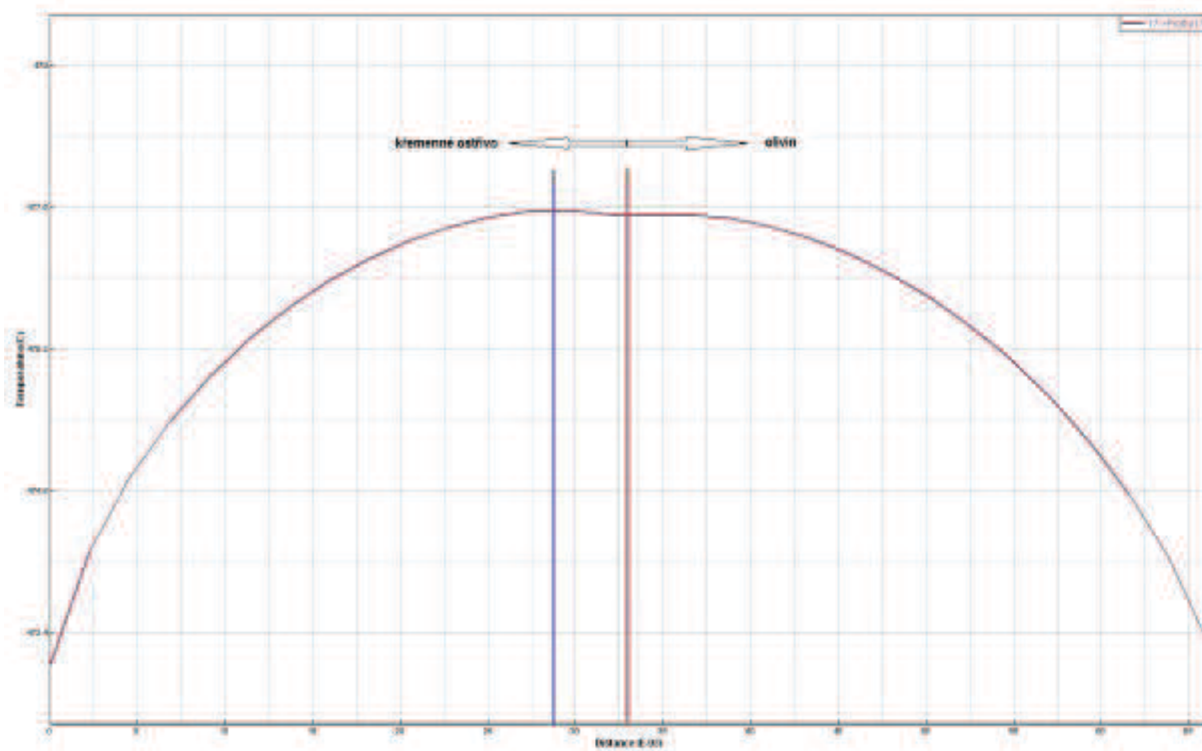
Obr. P2.5 Profil průběhu teploty v řezu pro směs s kerphalitem



Obr. P2.6 Řez reálného odlitku s vyznačenými osami (kerphalit)



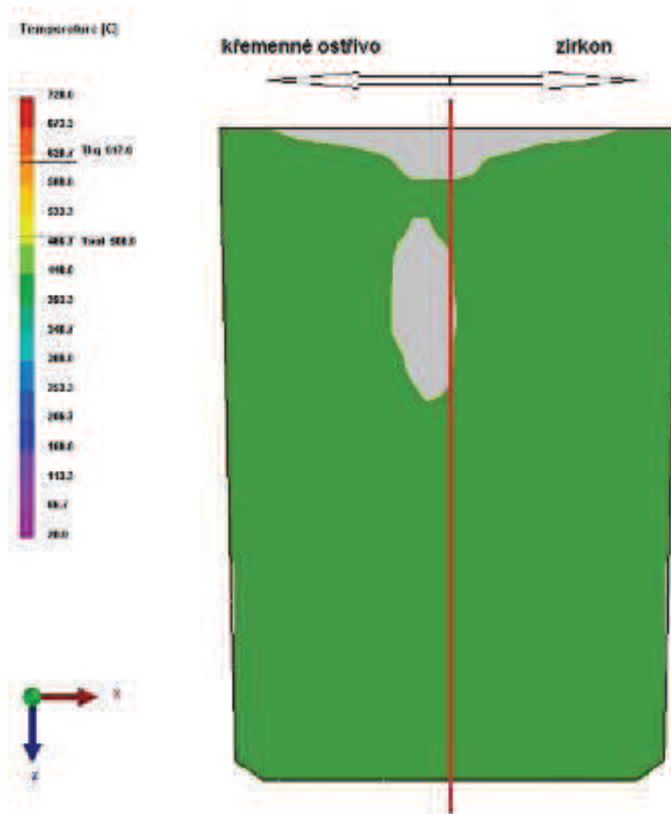
Obr. P2.7 Řez provedený v simulaci pro olivínovou směs



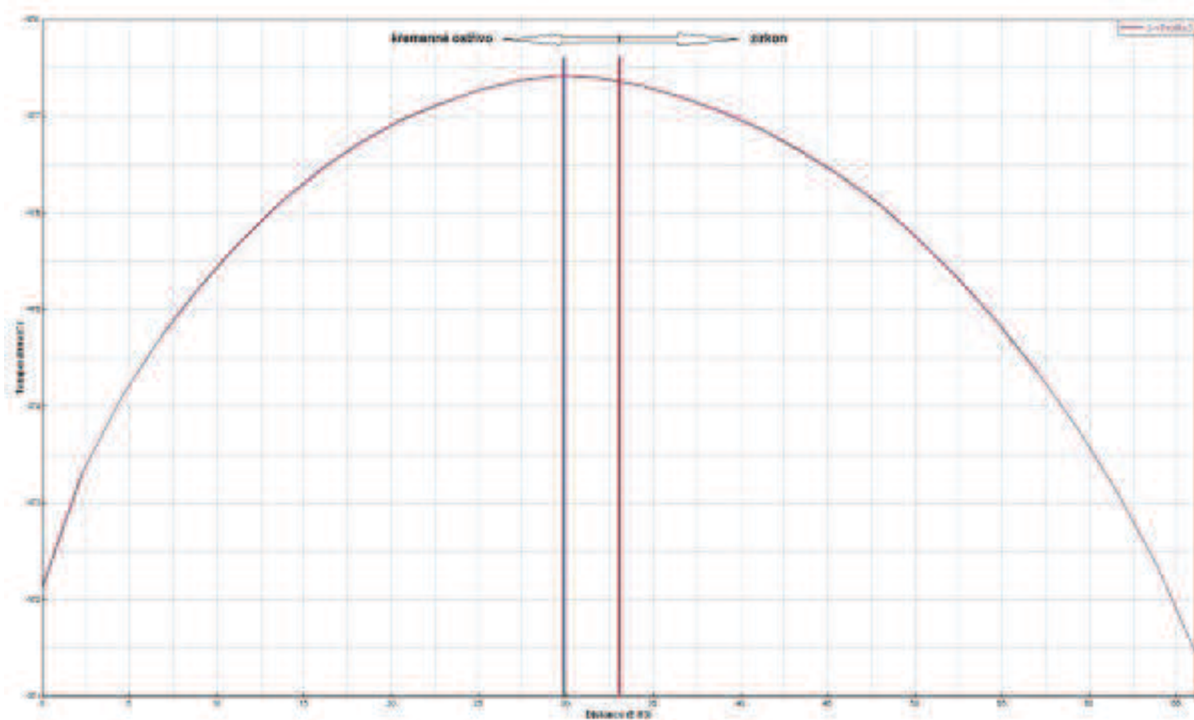
Obr. P2.8 Profil průběhu teploty v řezu pro olivínovou směs



Obr. P2.9 Řez reálného odlitku s vyznačenými osami (olivín)



Obr. P2.10 Řez provedený v simulaci pro zirkonovou směs



Obr. P2.11 Profil průběhu teploty v řezu pro zirkonovou směs



Obr. P2.12 Řez reálného odlitku s vyznačenými osami (zirkon)

Příloha 3

RICHARDS BAY MINERALS

TISAND (PTY) LTD
RICHARDS BAY IRON AND TITANIUM
(PTY) LTD
P.O.Box 401 Richards Bay 3900 South Africa
Tel : +27-351-9013111 Telex : 6-31361 SA RIBAMIN
Fax : +27-351-9013480



ZIRKONOVÝ PÍSEK „STANDARD GRADE“

CHEMICKÉ SLOŽENÍ - GARANTOVANÉ

ZrO ₂	min. 65,00 %
TiO ₂	max. 0,30 %
Fe ₂ O ₃	max. 0,25 %
U & Th	max. 500 ppm

CHEMICKÉ SLOŽENÍ - TYPICKÉ

ZrO ₂	66,00 %
Fe ₂ O ₃	0,20 %
TiO ₂	0,25 %
SiO ₂ celkem	32,70 %
volný	0,25 %
S	0,002 %
Al ₂ O ₃	0,18 %
CaO	0,10 %
MgO	0,03 %
Cr ₂ O ₃	0,002 %
PbO	0,003 %
P ₂ O ₅	0,14 %
H ₂ O	0,05 %
ztráta žiháním	0,30 %

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Měrná hmotnost	4,2 – 4,8 g/cm ³
Sypná hmotnost	2,7 g/cm ³
Sypný úhel	32 °
A.F.S.	113
d ₅₀	0,114 mm

TYPICKÁ SÍTOVÁ ANALÝZA

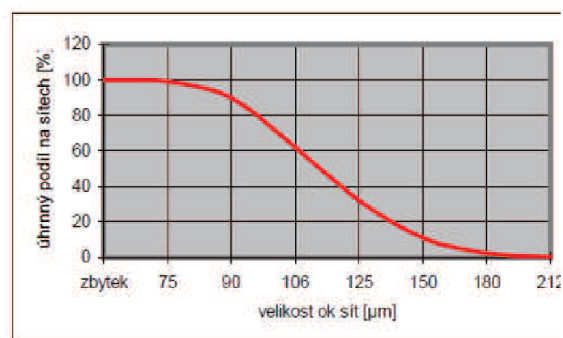
Zirkonový písek je přírodní materiál a síťová analýza se může lišit od uvedené :

velikost ok sít [μm]	velikost ok sít [mesh]	podíl na sítě [%]	úhrnný podíl na sítěch [%]
212	72	0,4	0,4
180	85	1,9	2,3
150	100	8,7	11,0
125	120	21,0	32,0
106	150	30,0	62,0
90	170	28,0	90,0
75	200	9,0	99,0
zbytek		1,0	100,0

DISTRIBUTOR pro ČR a SR



FORMSERVIS, spol. s r.o.
Obránská 60
614 00 Brno
tel/fax : 545 215 860, info@formservis.cz
www.formservis.cz





CHROMITOVÝ PÍSEK

Kvalitní ostrivo původem z Jihoafrické republiky určené pro přípravu slévárenských formovacích a jádrových tepelně namáhaných směsí.

Chromitový písek je žárovzdorný materiál získávaný těžbou chromitové rudy. Následně se třídí podle zrnitosti a odprašuje.

Ve slévárnictví je používán vzhledem k vysoké odolnosti proti penetraci a zapékání.

TYPICKÉ CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Cr ₂ O ₃	min. 46,00 %
SiO ₂	max. 1,00 %
Fe ₂ O ₃	29,00 %
Al ₂ O ₃	16,00 %
MgO	10,00 %
CaO	0,20 %
Na ₂ O	0,01 %
K ₂ O	0,01 %

TYPICKÁ SÍTOVÁ ANALÝZA

velikost ok sít [μm]	podíl na sítě [%]
> 1000	0,0 – 1,0
1000 - 710	0,0 – 5,0
710 - 500	5,0 – 15,0
500 - 355	20,0 - 40,0
355 - 250	30,0 - 45,0
250 - 180	10,0 - 25,0
180 - 125	3,0 – 12,0
125 - 90	0,5 - 3,0
90 - 63	0,0 - 1,5
< 63	0,0 – 0,5

OSTŘIVO VÁM DODÁ :

FORMSERVIS, spol. s r.o.
 Obřanská 60, 614 00 Brno
 tel/fax : 545 215 860, info@formservis.cz
 www.formservis.cz

Střední zrno

AFS = 45 – 55

$d_{50} \cong 0,27 - 0,35 \text{ mm}$

Hodnota pH

cca 8

Spotřeba kyseliny dle B.S.C.R.A. Spec. No.2

pH 3 = max. 5 ml

pH 4 = max. 4 ml

pH 5 = max. 3 ml

Spotřeba kyseliny dle VDG P28

cca 3 ml

Specifická hmotnost

4 500 kg/m³

Sypná hmotnost

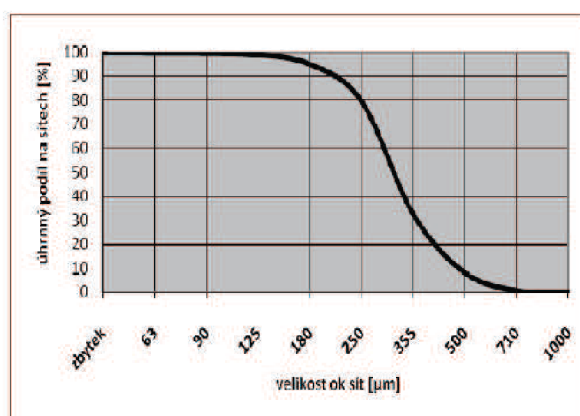
2 700 kg/m³

Žárovzdornost

>1 800 °C

Vlhkost

max. 0,2 %





OLIVÍNOVÝ PÍSEK

CHEMICKÉ SLOŽENÍ

MgO	48,5 – 50,0 %
SiO₂	41,5 – 42,5 %
Fe₂O₃	6,8 – 7,3 %
Cr₂O₃	0,2 – 0,3 %
Al₂O₃	0,4 – 0,5 %
NiO	0,3 – 0,35 %
MnO	0,05 – 0,10 %
CaO	0,05 – 0,10 %

ztráta žháním (900 °C, 30 min) max. 1,0 %

SÍTOVÁ ANALÝZA

velikost ok sít [μm]	síťová analýza typická [%]	upřesnění [%]
1000	0,0 %	0,0 %
500	0,8 %	max. 1,6 %
355	8,0 %	
250	54,0 %	
180	27,0 %	
125	7,0 %	
90	2,0 %	
zbytek	0,6 %	max. 1,0 %

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Střední zrno **Tvar zrn**
AFS = 50 téměř hranatá až hranatá

Povrch zrn **Tvrdość**
hladký 6,5 - 7,0 Mohsovy st.

Hodnota pH
8,9 – 9,5

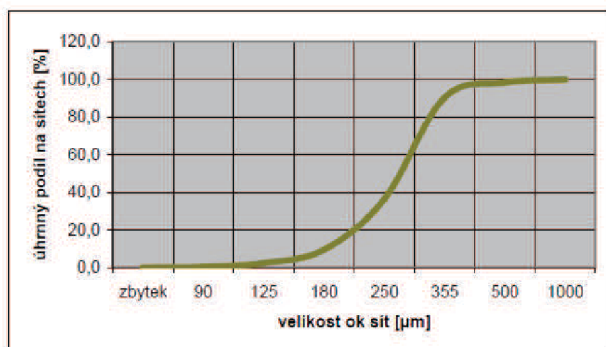
Specifická hmotn. **Sypná hmotnosť**
3 300 kg/m³ 1 700 – 1 900 kg/m³

Sypný úhel
asi 45°

Žárovzdornost **Bod slinutí**
asi 1 760 °C asi 1 450 °C

Tepelná roztažnosť
lineární asi 1,1 % při 1 200 °C

Činitel pro uložení zboží
0,54 m³/t



Příloha 6



KERPHALITE KF

Foundry sand

Kerphalite™ KF is a mineral product based on **andalusite**.
Kerphalite™ KF shows **high refractoriness** and **low thermal expansion** and therefore it is used as a foundry sand to prevent **veining** in Iron and Steel casting.
Due to the **low density** and total **compatibility with silica sand**, Kerphalite™ KF can be used pure or blended to improve the quality of any type of casting.

Kerphalite™ is suitable for all molding processes: **Green Sand**, **Coated Sand**, **Chemically Bonded** (whatever the binding system) and **Precision Castings**.

➤ *Chemical analysis and sizing:*

	<i>Size</i>	<i>AFS</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>
Kerphalite KF	100/400 μ	60					
	200/400 μ	50					
	100/300 μ	70	60.8%	38.1%	0.45%	0.10%	0.15%
	100/200 μ	100					

➤ *Physical characteristics:*

Specific gravity :	3.1 g/cm ³
Bulk density :	1.7 g/cm ³
Refractoriness (Seger Cone):	38 (1840°C)



154, rue de l'Université
75007 Paris - France
Tel. + 33 (0) 1.49.55.65.60
Fax + 33 (0) 1.49.55.65.55
E.mail: sales-andalusite@damrec.com
Web site: www.damrec.com

