

NETISKNOUT!  
Titulní list

NETISKNOUT!  
Zadání

**ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce bylo vyřešit vliv tekuté litiny s lupínkovým grafitem na penetraci do cementové formy. Byla navržena metodika zkoušky a její ověření bylo provedeno v experimentálních a provozních podmínkách. V práci byl potvrzen vznik komplexních sloučenin na rozhraní cementové formy a odlévaného kovu. Vytvořený matematický model mechanické penetrace prokázal vliv teploty a chemického složení grafitizující litiny na rozsah penetrace.

**Klíčová slova**

Penetrace, cementová formovací směs, litina s lupínkovým grafitem, matematický model.

**ABSTRACT**

Subject of the diploma thesis was to resolve influence of grey cast iron on penetration into cement sand. Methodology of trial was designed and its attestation was implemented in experimental and running conditions. On boundary-line cement sand and pouring metal was certified generation of complex allied substances. Created mathematical model of mechanical penetration proved influence of temperature and chemical composition of grey cast iron on range of penetration.

**Key words**

Penetration, Cement Sand, Grey Cast Iron, Mathematical Model.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

TOMEK, L. *Interakce tekutého kovu s formovací směsí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 70 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Interakce tekutého kovu s formovací směsí vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, 19.5.2008

.....  
Ladislav Tomek

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu prof. Ing. Karlu Rusínovi, DrSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Děkuji také Ing. Antonínu Záděrovi za častá inspirativní setkání, paní Aleně Málkové za vstřícnost a trpělivost při práci v laboratořích a také všem technickým pracovníkům za ochotu při realizaci experimentální části.

Zvláštní poděkování bych chtěl věnovat své rodině za podporu po celou dobu studia.

**OBSAH**

|  |    |
|--|----|
| Abstrakt.....  | 3  |
| Prohlášení.....  | 4  |
| Poděkování.....  | 5  |
| Obsah.....   | 6  |
| Úvod.....  | 8  |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST.....   | 9  |
| 1.1 Mechanismy penetrace.....                                      | 9  |
| 1.1.1 Mechanická penetrace.....                                    | 9  |
| 1.1.2 Chemická penetrace.....                                      | 13 |
| 1.1.3 Penetrace účinkem par kovů.....                              | 17 |
| 1.1.4 Explosivní penetrace.....                                    | 19 |
| 1.1.5 Expanzní penetrace.....                                      | 20 |
| 1.1.6 Penetrace iniciovaná cristobalitickou expanzí.....           | 21 |
| 1.2 Klasifikace vad povrchu.....                                   | 23 |
| 1.2.1 Drsný povrch.....  | 23 |
| 1.2.2 Povrchové připečeniny.....                                   | 24 |
| 1.2.3 Hluboké připečeniny – zapečeniny.....                        | 25 |
| 1.3 Zkoušky připečenin.....  | 27 |
| 1.3.1 Gertsmanův odlitek.....                                      | 27 |
| 1.3.2 Zkušební odlitek podle Fursunda.....                         | 28 |
| 1.3.3 Zkušební odlitek podle Mikšovského, Havlíčka a Bartušky..... | 29 |
| 1.3.4 Zkušební odlitek podle Jelínka.....                          | 30 |
| 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....   | 32 |
| 2.1 Návrh zkušebního tělesa a jader.....                           | 32 |
| 2.2 Experimentální tavba.....                                      | 34 |
| 2.2.1 Výroba jader.....  | 34 |
| 2.2.2 Výroba formy.....  | 35 |
| 2.2.3 Tavení a lití.....   | 36 |
| 2.2.4 Vytloukání a čištění.....                                    | 37 |
| 2.2.5 Příprava vzorků.....   | 38 |
| 2.2.6 Analýza rozhraní forma-kov.....                              | 39 |
| 2.2.7 Matematický model.....                                       | 51 |
| 2.3 Provozní tavba.....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.1 Výroba jader.....                  | 54 |
| 2.3.2 Výroba formy.....                  | 55 |
| 2.3.3 Tavení a lití.....                 | 57 |
| 2.3.4 Vytloukání, čištění a řezání ..... | 59 |
| 2.3.5 Matematický model .....            | 62 |
| 3 Návrh dalších experimentů .....        | 65 |
| 4 Závěr .....                            | 66 |
| Seznam použitých zdrojů .....            | 67 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů.....   | 69 |
| Seznam příloh.....                       | 70 |

## ÚVOD

Výroba jakostních odlitků vyžaduje, aby povrch odlitku byl hladký a bez povrchových vad. Jedna z těchto vad je způsobena penetrací kovu do slévárenské pískové formy. Výsledkem reakcí na rozhraní formy a kovu, v závislosti na stupni proniknutí kovu, mohou tedy být tyto povrchové vady: povrchová drsnost, připečeniny a zapečeniny. Tyto mohou mít významný vliv na snížení mechanických vlastností, zvláště pak na únavovou životnost. Jejich vliv může vést i ke zhoršení obrobitelnosti odlitků [1].

Ačkoliv je tato problematika studována ve velkém rozsahu téměř 60 let, i nadále způsobuje obrovské finanční ztráty za neshodnost odlitků nebo jejich opravné práce, v řádech desítek milionů dolarů [2],[3],[4]. Během samotného čištění odlitků vzniká velké množství křemenného prachu a různých plynů. To může pracovníkům způsobit vážné zdravotní komplikace [2].

U litinových odlitků mnoho teorií a řešení, navržených proti penetraci kovu, bylo odvozeno z výzkumných prací zabývajících se ocelovými odlitky. Nicméně autoři článku [2] ukazují, že tato problematika pro litinové a ocelové odlitky by měla být řešena odděleně.

Cílem diplomové práce je vyřešení vlivu tekuté litiny s lupínkovým grafitem na penetraci do cementových forem s rozdílnou granulometrií ostřiva.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Mechanismy penetrace

V publikacích kolektivu amerických autorů [2],[5],[6] jsou popsány mechanismy vzniku, příčiny, parametry kovu a formy, které mají vliv na vznik penetrace u litinových odlitků. O několik let později se tento kolektiv věnoval problematice penetrace i u ocelových odlitků [7], [8], [9]. Autory, kteří se zabývají touto problematikou, jsou prokázány následující způsoby penetrace kovu do slévárenské pískové formy:

- Mechanická penetrace
- Chemická penetrace
- Penetrace účinkem par kovů
- Explosivní penetrace
- Expanzní penetrace
- Penetrace iniciovaná cristobalitickou expanzí [11], [16]

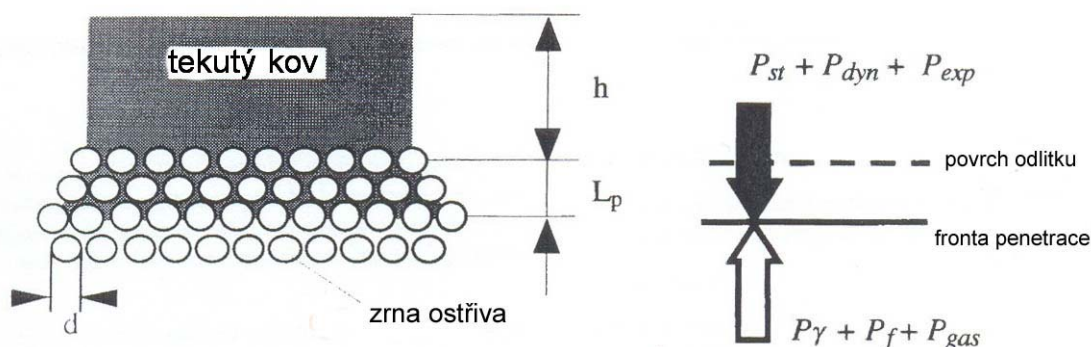
### 1.1.1 Mechanická penetrace

Kov může vstupovat do prostoru pórů ve formě za působení metalostatického, metalodynamického tlaku nebo působením kapilárních sil.

Platí rovnice tlakové rovnováhy **(1)** na rozhraní forma-tekutý kov [2]:

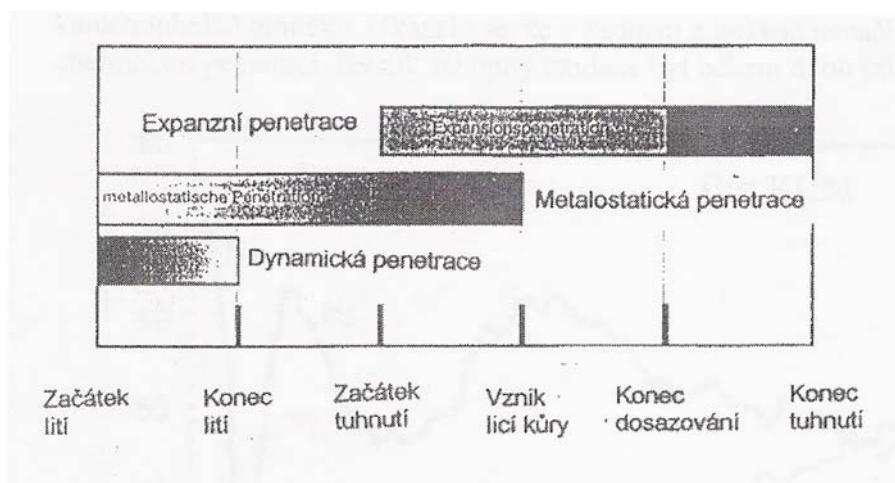
$$P_{st} + P_{dyn} + P_{exp} = P_{\gamma} + P_f + P_{gas} \quad (1)$$

|         |              |  |
|---------|--------------|--|
| Kde je: | $P_{st}$     | metalostatický tlak                            |
|         | $P_{dyn}$    | dynamický tlak                                 |
|         | $P_{exp}$    | expanzní tlak                                  |
|         | $P_{\gamma}$ | kapilární tlak                                 |
|         | $P_f$        | tlaková ztráta třením při pohybu kovu v pórech |
|         | $P_{gas}$    | tlak plynů ve formě                            |



**Obr.1.1 Princip porušení tlakové rovnováhy na rozhraní kov-forma [2]**

Levá strana rovnice (1) vyjadřuje tlaky v tekutém kovu, pravá strana odpor nebo naopak podporu pronikání kovu do formy. Je třeba uvést, že expanzní tlak působí pouze u grafitizujících litin (u ocelí tedy na levé straně rovnice vystupuje  $P_{st}$  a  $P_{dyn}$ ). Tlaky na pravé straně rovnice nepůsobí vždy všechny. Jejich působení během lití a tuhnutí je znázorněno na obr.1.2.



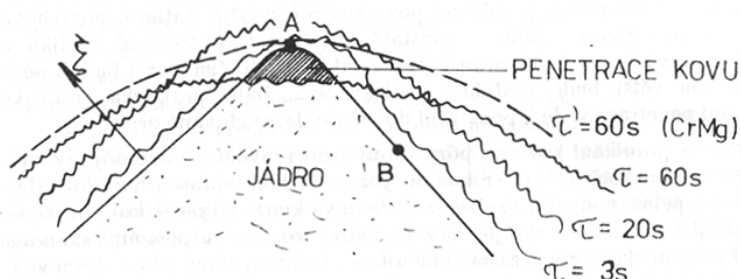
**Obr.1.2 Časový průběh působení mechanismů mechanické penetrace [10]**

Největší vliv na pravé straně rovnice (1) má kapilární tlak. Ten závisí především na úhlu smáčení, povrchovém napětí a na průměru pórů mezi zrna formovací směsi. Ostatní členy na pravé straně rovnice (1) dosahují podstatně nižších hodnot než kapilární tlak. Autoři [2] uvádějí že při měření tlaku plynů ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1-1,25 atm. Třecí odpor závisí na délce penetrace (délce toku kovu), viskozitě taveniny, rychlosti proudění a na pórovitosti formy.

Proces pronikání kovu do pórů formy není s největší pravděpodobností děj plynulý, ale probíhá skokově. Kov vnikne do póru s nízkou teplotou a ztuhne, čímž se zvýší tepelná vodivost vzniklé zapečeniny, která přijme i

latentní teplo krystalizace. Forma se ohřeje, kov se znovu roztaví a postoupí do větší hloubky. Tyto skoky se postupně zkracují [12].

Složitější tepelné poměry probíhají u pravých jader nebo vystouplých částí formy do kovu. Kov se odlévá s přehřátím a z toho vyplývá, že po naplnění formy je kov po určitou dobu ve styku s formou v tekutém stavu. Ukázat si to můžeme na tomto případu (obr. 1.3).



**Obr.1.3 Schéma natuhávání na klínovém jádře [12]**

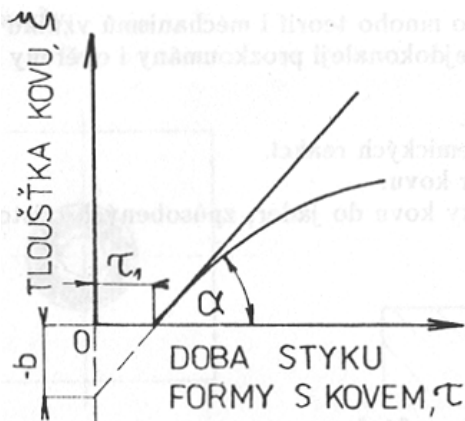
Podíváme se na průběh tuhnutí v bodě A a B. V bodě B, kde jádro odvádí předávané teplo, probíhá natuhávání kovu podle Schwarzova vztahu:

$$\xi = -b + k \cdot \sqrt{\tau} \quad (2)$$

Kde je:

- $b$  úsek na ose  $\xi$  odpovídající přehřátí kovu
- $k$  konstanta tuhnutí
- $\tau$  doba tuhnutí

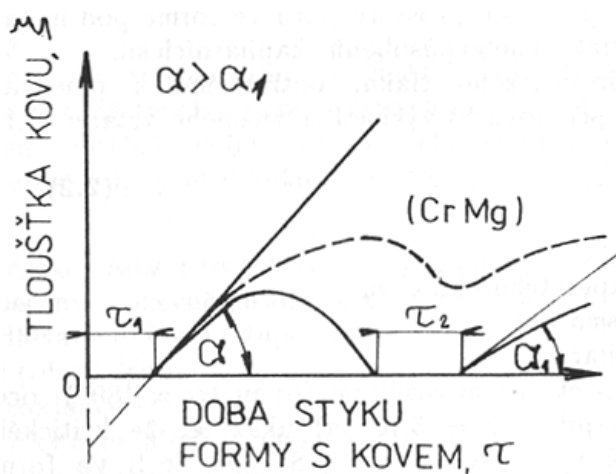
Natuhávání souvislé kúry  $\xi$  v bodě B tedy probíhá jako na povrchu formy tvaru polonekonečné desky. Pro vznik penetrace je nebezpečný pouze časový úsek  $\tau_1$ , po který je tekutý kov ve styku se "studeným jádrem" (obr. 1.4).



**Obr.1.4 Tuhnutí kovu v bodě B [12]**

Jiný průběh tuhnutí lze pozorovat v bodě A. Počáteční rychlé natuhávání kůry kovu je zpomalováno vlivem dvoustranného prohřívání formy i jádra. Nerovnováha mezi přívodem a odvodem tepla jádra způsobuje, že teplota líce v bodě A stoupne nad teplotu pseudoisosolidy [12]. Kov se opět natavuje, a to až do obnažení celé špičky, což pak trvá po časový úsek  $\tau_2$ . Až poté nastane proces opětovného natuhávání, avšak s nižší rychlostí tuhnutí ( $\alpha > \alpha_1$ ) - (obr.1.5). Cyklické natuhávání je tedy příčinou opětovného styku tekutého kovu s obnaženým jádrem ( $\tau_2$ ). Ten je podstatně nebezpečnější než v úseku  $\tau_1$ . Je to proto, že jádro je vyhřáto na teploty vyšší než je teplota solidu.

Rychlost a hloubka prohřátí jádra závisí na koeficientu tepelné akumulace  $b_f$ . Použití směsí s vysokým ochlazovacím účinkem (chrommagnezit, zirkon, korund, kovové ostřívo) nedovolí, aby došlo k roztavení prvotní kůry odlitku a k penetraci za stejných podmínek lití nedojde.



Obr.1.5 Tuhnutí kovu v bodě A [12]

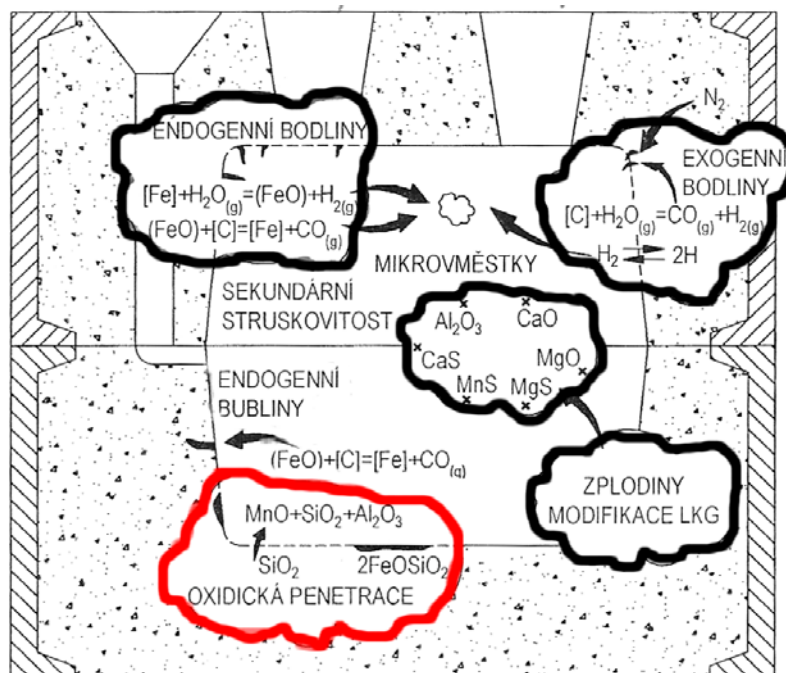
Mechanická penetrace je hluboce studována mnoha autory. V publikaci [2] je uvedena tabulka s faktory, které ovlivňují mechanickou penetraci:

| Zvýšení podporuje sklon k penetraci                | Zvýšení snižuje sklon k penetraci         |
|--|---|
| Metalostatický tlak                                | Povrchová energie (napětí)                |
| Dynamický tlak                                     | Úhel smáčení mezi kovem a formovací směsí |
| Velikost pískových zrn (prodyšnost, hustota směsi) | Nátěry                                    |
| Licí teplota                                       | Upěchování směsi                          |

Tab.1.1 Faktory ovlivňující mechanickou penetraci [2]

### 1.1.2 Chemická penetrace

Při výrobě odlitků a lití kovu na vzduchu dochází od okamžiku vylití kovu z tavicí pece, v odlévací pánvi a po průchodu slévárenskou formou k sekundární oxidaci. Při styku slitin železa s kyslíkem během odlévání na vzduchu se oxidují všechny prvky, které mají za daných podmínek vyšší afinitu ke kyslíku než železo. Důsledkem reoxidace jsou pevné, tekuté a plynné produkty, které mohou reagovat se slévárenskou formou za vzniku různých povrchových i vnitřních vad odlitku. Přehled vad přináší schematicky obr. 1.6.



**Obr.1.6 Reoxidační procesy ve slévárenské formě a její důsledky [13]**

Když tekutá ocel nebo litina vstoupí do pískové formy, předává své teplo formě, ve které se nejdříve začíná rozpínat vzduch mezi zrny ostřiva. Pokud se jedná o syrovou formu, pak teplo způsobí změnu volné vody v páru a forma na rozhraní s kovem se vysušuje. Kyslík z vodní páry může reagovat s uhlíkem obsaženým v kovu nebo se železem a doprovodnými prvky v oceli a litině. Pořadí, v jakém dochází k oxidaci prvků obsažených v tekutém kovu, je dáno afinitou ke kyslíku, jejíž mírou je záporná hodnota volné entalpie. Ta je vyjádřena vztahem:

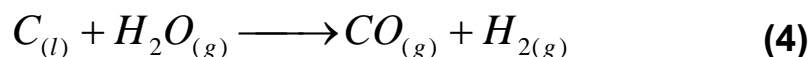
$$A = -\Delta G = -\Delta H + T \cdot \Delta S \quad (3)$$

Kde je:  $\Delta H$  reakční teplo  
 $\Delta S$  změna entropie  
 $T$  teplota

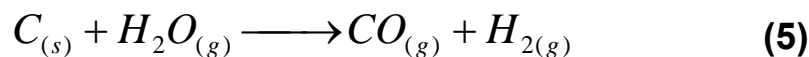
Čím zápornější je hodnota  $\Delta G$  reakce vyjadřující vznik oxidu, tím je oxid termodynamicky stabilnější. Důležité je také zvláštní postavení uhlíku proti všem prvkům. Jeho  $\Delta G$  s teplotou klesá do zápornějších hodnot a jeho afinita ke kyslíku tedy s rostoucí teplotou roste. Uhlík tak může za vysokých teplot redukovat většinu oxidů [13].

Nás bude v dalším zajímat mechanismus oxidické penetrace. Ten je nejčastěji spojován s litou ocelí. U syrových pískových forem se při odlévání oceli a litiny můžeme setkat s těmito reakcemi:

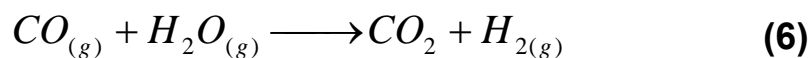
Reakce vodní páry s C rozpuštěným v oceli nebo litině:



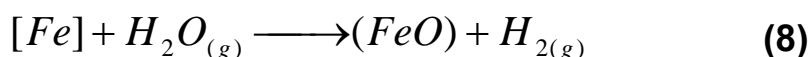
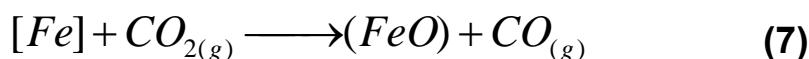
Reakce vodní páry s C z uhlíkatých materiálů (kamenouhelná moučka):



Oxid uhelnatý, který takto vznikl, může reagovat s vodní párou:



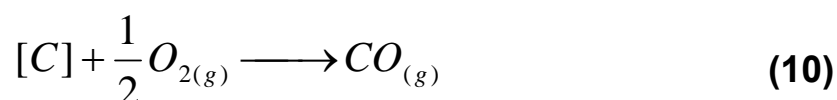
Na rozhraní forma – kov může být železo a další prvky oxidovány  $CO_2$ :



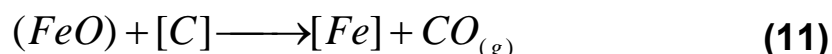
Autoři článku [8] uvádějí, že plyny na levé straně rovnice (7) a (8) přednostně reagují s dostupným uhlíkem podle rovnic (4), (5) a (9):



U forem s nízkou vlhkostí a bez uhlíkatých látek (vodní sklo, teoreticky cement) může přicházet v úvahu reakce mezi  $O_2$  ze vzduchu a uhlíkem rozpuštěným v kovu podle rovnice:



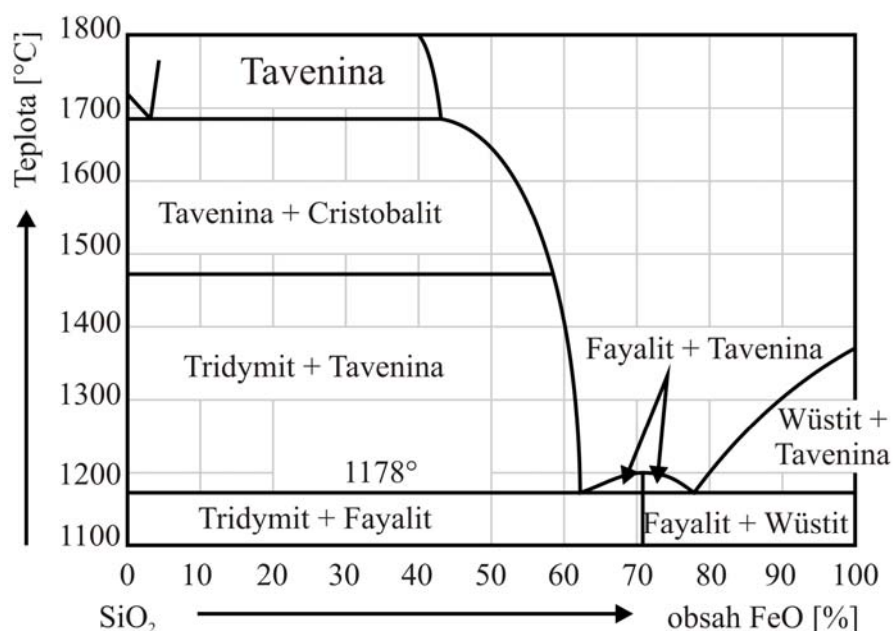
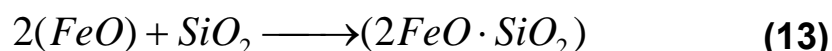
Reakce kovových oxidů s uhlíkem rozpuštěným v tavenině (ocel nebo litina):



Doprovodné prvky reagují s kyslíkem rozpuštěným v železe dle rovnice:



Formou strusky tedy vznikají oxidické produkty ( $FeO$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ), které mohou reagovat s  $SiO_2$  křemenného ostřiva za vzniku nízkotajících křemičitanů (např. fayalitu s bodem tání  $1205^\circ C$ ) – obr. 1.7- podle rovnice:

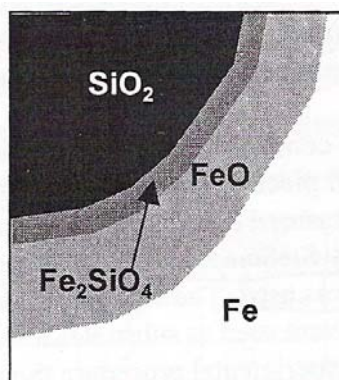


Obr.1.7 Rovnovážný diagram  $SiO_2$ - $FeO$  [14]

Nedávné výzkumy z USA potvrzují, že chemická penetrace probíhá jen u ocelových odlitků, zatímco u litinových odlitků se uplatňuje pouze mechanická penetrace [7]. Autory [2] bylo prokázáno, že oxidace probíhá v pořadí C-Si-Mn-Fe. To znamená, že uhlík je přednostně oxidován před železem a tak brání jeho oxidaci.

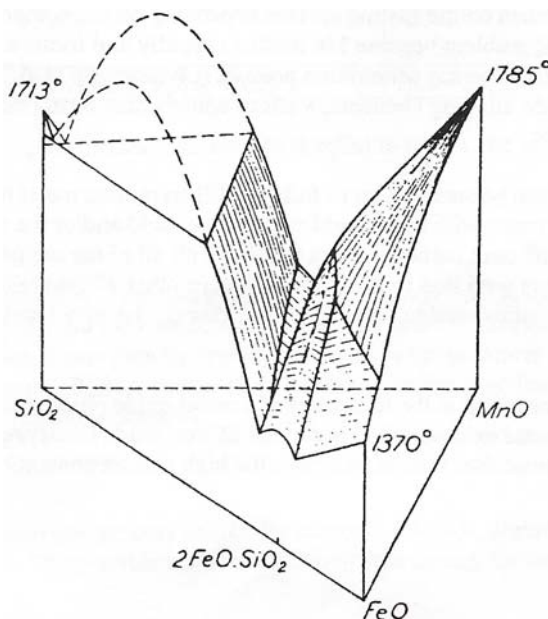
Při rozboru reakcí na povrchu formy po nalití kovu je nutné uvažovat s účinkem atmosféry ve formě. Především je důležitý poměr  $CO$  k  $CO_2$ . Zvýší-li se koncentrace  $CO_2$ , dochází k výrazné oxidaci kovu. Toto bylo potvrzeno v práci [7], kdy bylo zjištěno, že čím víc má atmosféra formy oxidační charakter, tím více probíhá chemická penetrace. Další výzkum ukázal, že atmosféra na rozhraní forma-kov při odlévání ocelových odlitků závisí na druhu pojiva, zvláště na obsahu uhlíku a vlhkosti se směsí [8]. Na rozdíl od

litinových odlitků, které jsou chráněny vysokým obsahem C v kovu, je ocel náchylná k chemické penetraci, i když se významným způsobem změnila atmosféra formy. Stejný výzkumný tým zjistil [9], že u uhlíkových ocelí je možný obojí způsob penetrace, chemická i mechanická. Když se objeví mechanická penetrace, neprobíhají mezi kovem a pískem žádné reakce. V případě chemické penetrace se vytváří blízko kovové matrice vrstvička FeO a v blízkosti křemenného písku vrstvička fayalitu (*obr.1.8*). Penetrovaný kov bývá oduhličen.



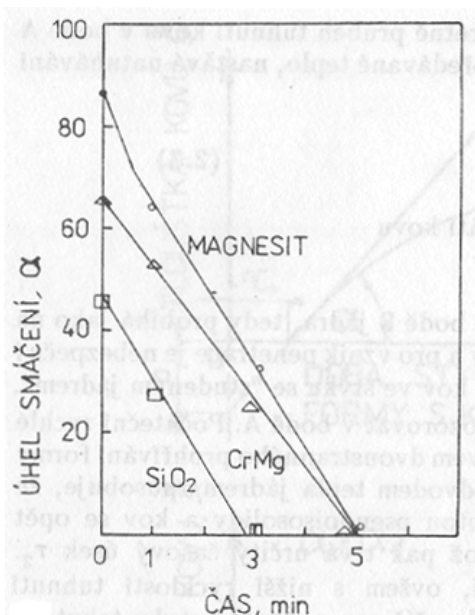
**Obr.1.8 Charakteristické oblasti při vzniku chemické penetrace [9]**

Autoři [2] uvádějí, že hloubka penetrace se zvyšuje s obsahem  $O_2$  v tavenině a s obsahem Mn. S vyšším obsahem Mn (ten je charakterizován poměrem Mn/Si [12]) může docházet ke vzniku komplexních sloučenin z ternárního systému FeO-SiO<sub>2</sub>-MnO (*obr.1.9*). Komplexní sloučeniny tohoto typu, obdobně jako fayalit, smáčí formu a mění povrchovou energii křemenného ostříva při pronikání nízkotajících křemičitanů i kovu do formy.



**Obr.1.9 Ternární diagram FeO-SiO<sub>2</sub>-MnO [7]**

Pokud podrobněji prostudujeme rovnici (1), tak zjistíme, že kapilární tlak vystupuje na pravé straně rovnice. Pokud je úhel smáčení větší než  $90^\circ$ , potom kapilární tlak brání proniknutí kovu mezi zrna. Dojde-li však k chemické reakci mezi kovem a materiálem formy, tak se prudce snižuje tento úhel, a to bez ohledu na druhu použité formovací směsi [13] (obr.1.10). Kapilární tlak bude mít zápornou hodnotu a kov je do mezizrnových prostorů nasáván. Kromě chemické penetrace bude tedy působit i mechanická penetrace.



**Obr.1.10 Změna úhlu smáčení s dobou styku odlitku s formou [14]**

### 1.1.3 Penetrace účinkem par kovů

Teorie mechanické penetrace nedovede odpovědět na některé skutečnosti, související se vznikem hlubokých zapečenin. Rovněž penetrace chemickou reakcí nemůže vznik hlubokých zapečenin úplně vysvětlit. Nejzávažnější z námitek je ta skutečnost, že není dostatečně vysvětlena vysoká koncentrace čistého kovu v zapečeninách (vyšší než 50%) [12]. Zpětná redukce žilek proniklých oxidů nebo křemičitanů vodíkem je málo pravděpodobná.

Koncepce penetrace kovu přes páry kovů byla poprvé použita Jonesem (1948), který stanovil, že část množství par kovů může difundovat do formy (jádra) a tam kondenzovat. Pozoroval, že je-li odlitek krátce po odlití vylit, vzniká pevná hladká souvislá kůra a není pozorována žádná penetrace. Když stejný odlitek mohl ztuhnout normálním způsobem, vyskytovala se u něj určitá zapečenina. Proto vyslovil názor, že kov mohl proniknout jen přestupem par. Sanders [15] objasňuje vznik zapečenin tvorbou plynného pentakarbonylu železa  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  na rozhraní forma-kov a jeho difuzí do formy, kde se rozkládá na železo(ferit) a CO. Tento proces je doprovázen dalšími chemickými reakcemi za vzniku fayalitu. Navíc tvorbu karbonylů porušuje přítomnost kyslíku. Kohlmeyer předpokládá transport kovu dokonce přes monokarbonyl

železa Fe(CO) [11]. Karbonyly jsou stabilní při teplotách slévárenské formy pouze za vysokých tlaků (1-3 MPa). Ve slévárenské formě je dosažení takto vysokých hodnot tlaku nereálné, proto pro tuto teorii chybí základní předpoklady a důkazy [11].

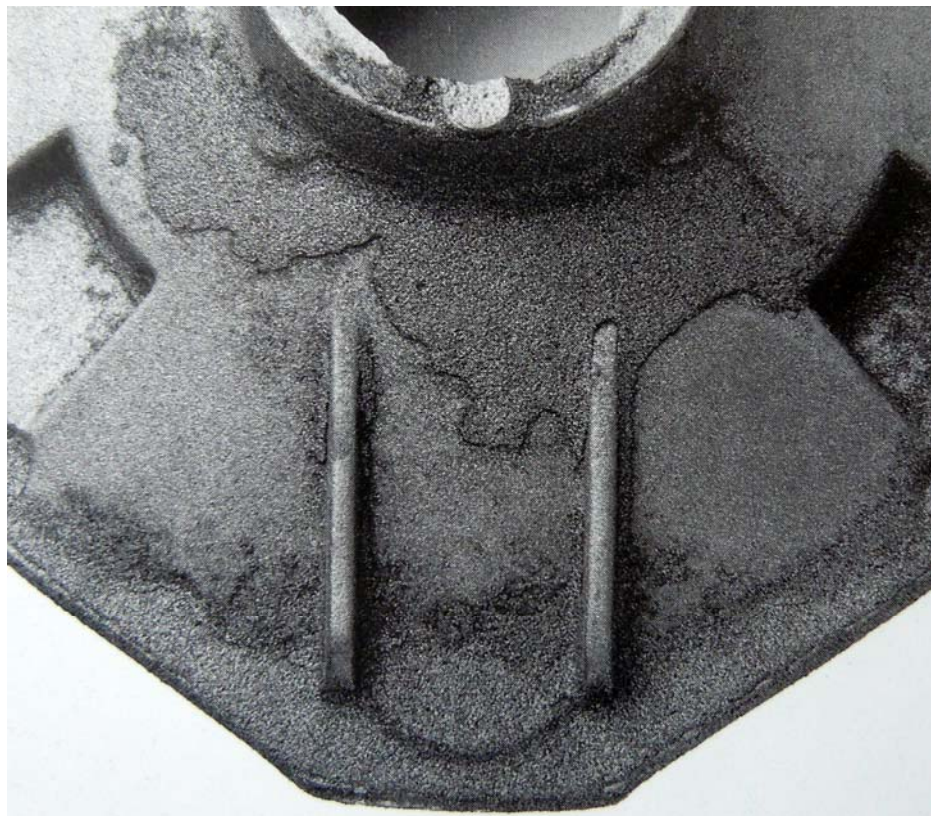
Zatím nejpravděpodobnější teorii o penetraci za účasti par kovů vypracoval Svoboda [16], který zkoumal vznik zapečenin u běžných odlitků. Vysoká koncentrace Mn byla zjištěna ve větší hloubce formy. A to jak čistého Mn, tak i fáze 70% Fe a 30% Mn. Vysoká koncentrace Mn je vysvětlována jeho vysokou rychlostí vypařování. Experimenty prováděl se vzorky formy uzavřené v nepropustné korundové trubici. Tyto vzorky byly zavěšeny nad lázni bez kontaktu a při přímém kontaktu s kovem. Byla potvrzena teorie mechanismu penetrace přes plynnou fázi. U zkoušek bez kontaktu s kovem dochází k toku kovových par do formovacího materiálu. Tyto páry obsahovaly  $(\text{FeO})_2$  a  $(\text{MnO})_2$ . Jediným faktorem pro řízení rychlosti vypařování byl parciální tlak kyslíku (kontrolovaná atmosféra). Druh formovacího materiálu se neprojevil žádným rozdílným účinkem na průběh difúze. Difúzní rychlost (pronikání par kovu do formovací směsi) se zvyšovala jen s velikostí pórů v upěchované směsi. Vzorky, které byly podrobeny působení kovových par a pak ponechány kontaktu s tekutým kovem vykazovaly určitou mechanickou penetraci, ale vzorky, na které nepůsobily kovové páry byly bez zapečenin. Svoboda pak předložil následující mechanismus penetrace:

*Penetrace přes páry kovu je proces, který spočívá v tvorbě těkavých kovových látek na rozhraní forma-kov, difúzi těchto látek a tepla do formy, s následnou kondenzací ve směsi. Nejpravděpodobnějšími kovovými látkami jsou buď elementární kovové páry nebo těkavé molekuly kovových oxidů typu  $(\text{FeO})_2$ . Zvláštní úlohu hrají páry manganu a těkavých oxidů  $(\text{MnO})_2$ , která je způsobena jejich velmi vysokou tenzí.*

Tenký film kovu, který se vytváří při penetraci na zrnech formovací směsi ve značné hloubce, zásadně mění smáčecí charakteristiky kov-forma a tím umožňuje snadnou druhotnou vlnu hluboké penetrace tekutého kovu. Vyloučením kovových filmů na zrnech se zásadně mění i tepelné vlastnosti formy. Zvětší se podíl přestupu tepla probíhá ve formě radiace, tj. sáláním tepla kovu do formy, tím se zvyšuje teplota ve větších hloubkách a tekutá fáze proto vniká hluboko do formy [12]. S klesající teplotou penetrace tekuté fáze ustává, avšak přes páry pokračuje až do teplot 600°C. Tento princip sehrává vážnou úlohu především u masivních odlitků s několikahodinovou dobou tuhnutí a dlouhou dobou chlazení.

#### 1.1.4 Explosivní penetrace

Velkoplošná explozivní penetrace vzniká v oblastech, kde dochází k rychlému zaplnění formy kovem. Penetrovaná plocha je ostře ohraničena od povrchu samotného odlitku (*obr.1.11*). Pro vznik této vady je rozhodující explozivní odpaření vody při vtékání kovu do formy. To způsobí dynamický ráz, který na velkých plochách zatlačuje kov do pórů ve formovací směsi. K tomuto jevu dochází především tam, kde se formuje vysokými měrnými tlaky, u silně upěchovaných forem s nízkou prodyšností a vyšší vlhkostí [12]. Jak uvádí autor [10], dle zkušeností z českých sléváren, dochází k podobnému efektu (explozi) i v důsledku nahromadění a uzavření prostoru ve formě i s jinými výbušnými látkami než jen s vodní parou. Při studiu řezu vrstvy explozivní penetrace byl zajímavý minimální počet propojení mezi penetrovanou vrstvou a odlitkem. Penetrovaná vrstva se tedy dala snadno odloupnout [10].



**Obr.1.11 Velkoplošná explozivní penetrace [10]**

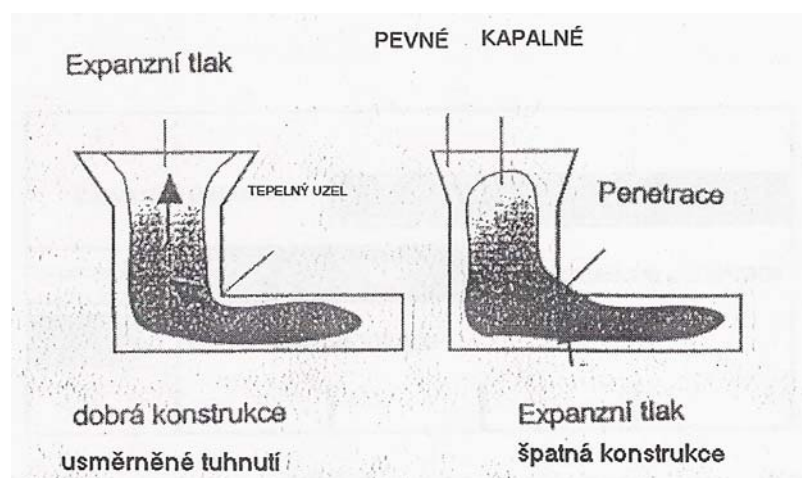
### 1.1.5 Expanzní penetrace

Týmy autorů v pracích [2] a [12] uvádí tento speciální mechanismus vzniku penetrace u grafitizujících litin. Během eutektického tuhnutí, způsobeného nižší měrnou hmotností vznikajícího grafitu, dochází k významné expanzi. Roztahující se materiál vyvolává na stěnu formy podstatný tlak a může způsobovat rozsáhlé penetrace kovu. Penetrace roste se stoupajícím stupněm eutektičnosti a dosahuje maxima při eutektickém složení [12]. To je pravděpodobně způsobeno rostoucím množstvím eutektického grafitu a tomu odpovídající velikosti expanzního tlaku. Pokud se nepodaří tento tlak uvolnit do náličky, tak potom může v oblasti prohrátých rohů formy dojít právě k expanzní penetraci (*obr.1.12*).

Autoři článku [2] dále uvádí příznivý vliv obsahu fosforu na snižování penetrace. Vysvětlují to zlepšením dosazovací schopností litiny. To znamená, že tlak vzniklý expanzí se snadněji uvolní do náličky. Autor [12] uvádí, že při obsahu P 0,2% tento problém zcela zmizí. To znamená, že expanzní penetrace může být potlačena nepatrným zvýšením obsahu fosforu, jestliže je to však pro danou slitinu přípustné.

Jako řešení při výskytu této penetrace autoři [2] doporučují změnu tvaru odlitku nebo jeho náliťování, aby bylo dosaženo usměrněného tuhnutí. Vliv má také stupeň očkování, chemické složení litiny a teplota lití. Tým autorů [2] doporučuje provádět simulaci plnění a tuhnutí na PC, a tímto způsobem dopředu již při řešení návrhu technologie vznik vady eliminovat.

Izolované oblasti tekutého kovu při tuhnutí odlitků jsou nebezpečné jak u litin, tak u ocelí. S tím rozdílem, že u ocelí vznikají řediny a u litin expanzní penetrace.



**Obr.1.12 Mechanismus expanzní penetrace [10]**

### 1.1.6 Penetrace iniciovaná cristobalitickou expanzí

Příčiny a důsledky tohoto pochodu byly pozorovány u směsí s vodním sklem v pracích [11] a [17]. Křemenné písky vysoké chemické čistoty ( $\alpha$  –  $\text{SiO}_2$ ) při ohřevu nad  $900\text{--}1000^\circ\text{C}$  prodělávají nezvratnou modifikační přeměnu na nízkoteplotní cristobalit. Jelikož při přechodu  $\alpha$  –  $\text{SiO}_2$  na cristobalit dochází k podstatným změnám v krystalové mřížce (hexagonální  $\longrightarrow$  krychlová), je tato přeměna řazena k tzv. „pozvolným přeměnám“ [17]. Cristobalitická přeměna je doprovázena značným růstem objemu (15,7 obj.% [16]). Rovnovážná teplota modifikační přeměny leží mezi  $1050\text{--}1100^\circ\text{C}$  [17]. Změna  $\alpha$  –  $\text{SiO}_2$  na cristobalit je reakcí v pevné fázi a začíná na volném vnějším i vnitřním povrchu. Cristobalizace je tedy urychlována kationy podle následujících řad:

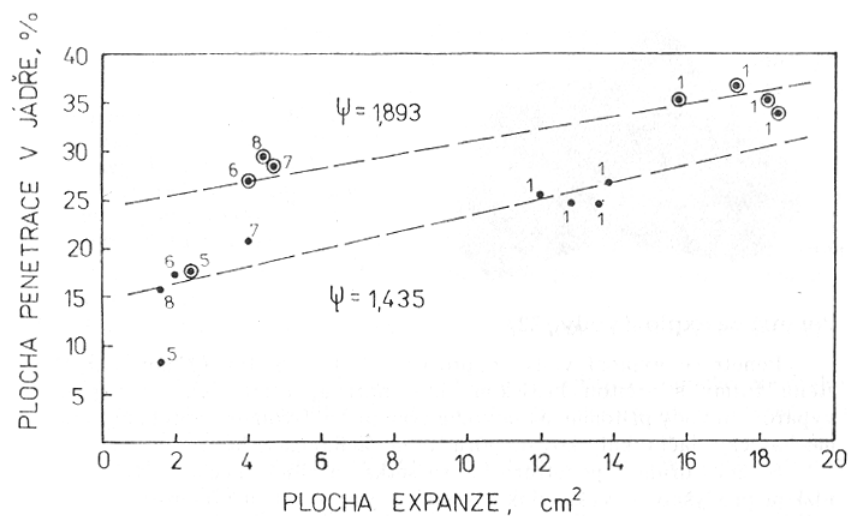


Je-li mineralizátor v tekuté fázi (vznik křemičitých skel např. u směsí s vodním sklem), pak se celý proces ještě více zrychluje [17]. Bez mineralizátorů tedy probíhá pochod velmi pomalu a vzniká cristobalit s vysoce defektní strukturou [17]. Naopak komplexotvorné kationy ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{P}^{5+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) brzdí cristobalizaci.

Vznik cristobalitu je příčinou expanze jader (růst objemu a trhlin), která je ovlivňována nejen podmínkami chemického složení směsi, jemností a mineralogickou čistotou křemenného písku, ale především teplotními podmínkami v jádře a na rozhraní jádro-kov. Objemové změny jader pak nejsou úměrné koncentraci cristobalitu [11]. Závisí na tepelném namáhání jádra ( $\psi$ ), které vyjadřuje vzájemné působení odlitku a jádra [17]. Prvotní natuhlá kůra odlitku se může opět roztavit (při vysoké hodnotě  $\psi$ ) a umožní další průběh expanze (vznik trhlin) až do doby, než kůrka natuhne (periodické tuhnutí) a má již takovou pevnost, že jádro již dále nemůže narůstat i přesto, že cristobalitická expanze postupuje v objemu jádra. Při nízké hodnotě  $\psi$  nedojde vůbec k objemovým změnám ani vzniku trhlin i když cristobalizace proběhne [11].

U vysoce namáhaných jader je tedy (kde proběhne cyklické natuhávání kovu) expanze doprovázena roztržením a deformací jader, vznikem výronků kovu. S růstem cristobalitické expanze roste sklon směsí k hlubokému zapékání, a to tím výrazněji, čím je tepelné namáhání jader  $\psi$  vyšší (obr. 1.13).

Cristobalit je přítomen v zapečeninách a expanze způsobuje porušení i sebedokonalejšího nátěru nebo námazku [12]. Výronky jsou pak místa průniku kovu do značné hloubky (obr. 1.14). Vzniká hluboká zapečenina, která je často snadno oddělitelná od odlitku [12].



- 1 - křemenný písek + vodní sklo
- 5 - křemenný písek + vodní sklo + okuje
- 6 - křemenný písek + vodní sklo + bauxit
- 7 - křemenný písek + vodní sklo + FeCr struska
- 8 - křemenný písek + vodní sklo

Způsob vytvrzování jader:

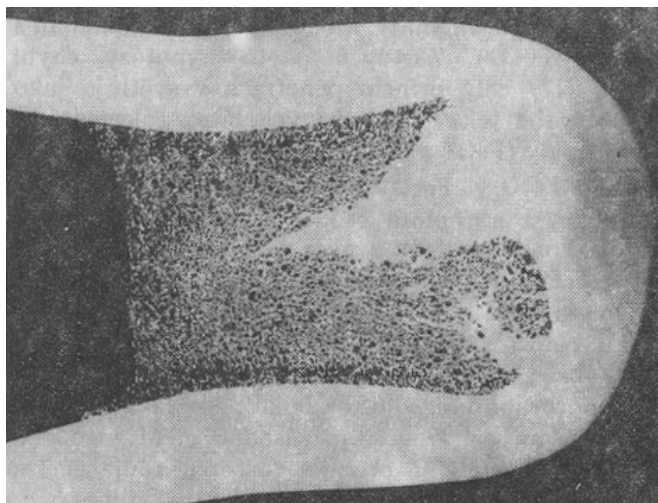
- 1, 5, 6 - CO<sub>2</sub> proces
- 7 - samotvrdnoucí směs
- 8 - zpěněná samotvrdnoucí směs

$$\psi = \frac{R_1}{R_j} \quad (\text{tepelné namáhání jádra})$$

$R_1$  - relativní tloušťka odlitku (nebo jeho části)

$R$  - relativní tloušťka jádra

**Obr.1.13 Vliv cristobalitické expanze na penetraci oceli do jader pojených vodním sklem s rozdílným tepelným namáháním [11]**



**Obr.1.14 Výronek kovu s hlubokou zapečeninou [11]**

## 1.2 Klasifikace vad povrchu

Autor [12] uvádí, že třída vad povrchu se dle podílu na celkové neshodnosti nachází na čtvrtém místě. Nicméně co do nákladů na opravy odlitků by byla tato třída na předním místě. Často jsou to jen vady vzhledu odlitku, které neovlivňují životnost součástí a záleží na odběrateli, zda je ochoten je tolerovat a v jakém rozsahu. Jedná se o vady odstranitelné. Avšak jejich odstraňování je velmi pracné a nákladné [12].

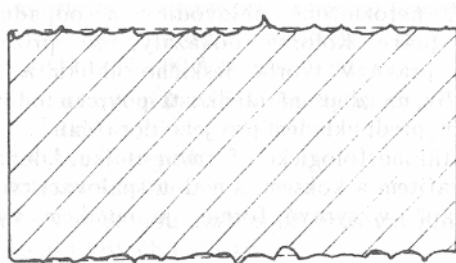
Vady související s procesem penetrace jsou v publikaci T. Elbela a kol. [12], která tvoří východisko k revizi a úpravě normy ČSN 42 1240 (platná od roku 1964), zahrnutý do třídy 200 (Vady povrchu) a skupiny 210 (Přípečeniny) [12]. Jejich rozlišení je provedeno na základě hloubky zapenetrování.

**Skupina vad: 210 Přípečeniny**

**Vada číslo: 211 Drsný povrch**  
**212 Povrchové přípečeniny**  
**213 Hluboké přípečeniny - zapečeniny**

### 1.2.1 Drsný povrch

Schéma vady:



**Obr.1.15 Drsný povrch [12]**

Popis vady:

Jedná se o hrubý, drsný povrch odlitku, způsobený dokonalým smočením líce formy (jádra) kovem do hloubky poloviny průměru zrna ostřiva. Vrstva písku přilehlá k povrchu odlitku se poměrně lehce odděluje. Vlastní proces čištění však výrazně mění povrchovou drsnost litého povrchu a to jak v kladném, tak i záporném smyslu [12].

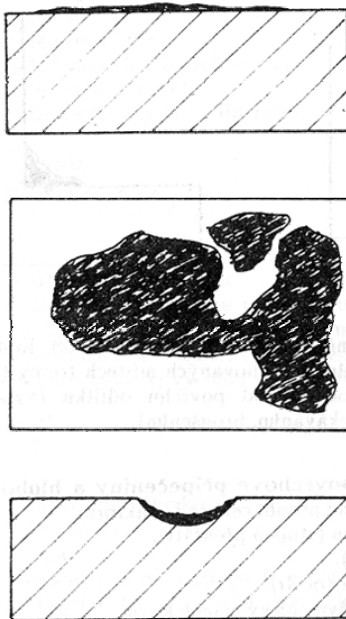
Způsob zjištění vady:

Hodnocení drsnosti ploch odlitku v litém stavu se provádí komparační metodou dle ČSN 01 4456 [18]. Princip metody spočívá v subjektivním porovnávání drsnosti odlitku s příslušným etalonem. Zkouška probíhá při šikmo dopadajícím umělém světle. Na základě řady drsností ISO se používá

sada kovových etalonů v odstupňované drsnosti litého povrchu [12]. V praxi se používá hodnocení v rozmezí 4-100  $\mu\text{m Ra}$ .

### 1.2.2 Povrchové připečeniny

Schéma vady:

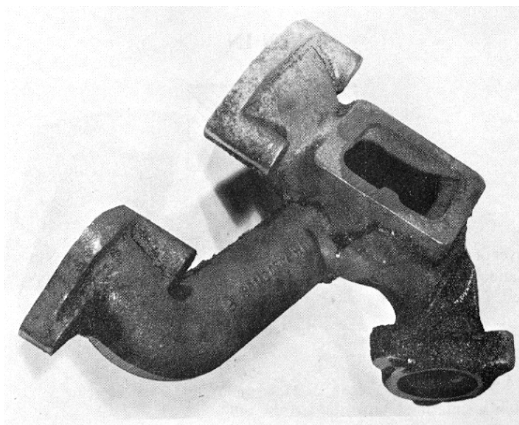


**Obr.1.16 Povrchová připečenina [12]**

Popis vady:

Poměrně tenká a vysoce adhesní vrstva písku vyskytující se často na rovných plochách. Kov penetruje do větší hloubky než je průměr zrna ostříva [12]. Vada se vyskytuje na nejteplejších částech odlitku [19]. Odstranění připečenin je technicky náročné a obtížné. Lze ho dosáhnout opakovaným broušením a tryskáním [12].

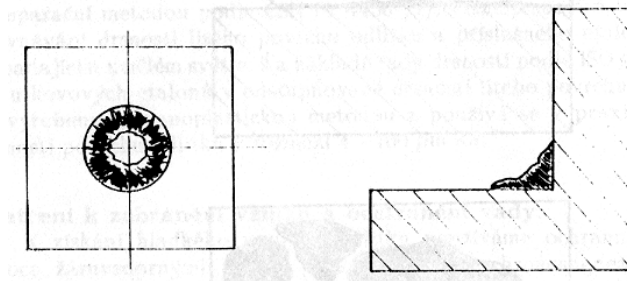
Příklad:



**Obr.1.17 Spojka výfukového potrubí, litina s kuličkovým grafitem, „směs na syrovo“ [19]**

### 1.2.3 Hluboké připečeniny – zapečeniny

Schéma vady:



Obr.1.18 Hluboká zapečenina [12]

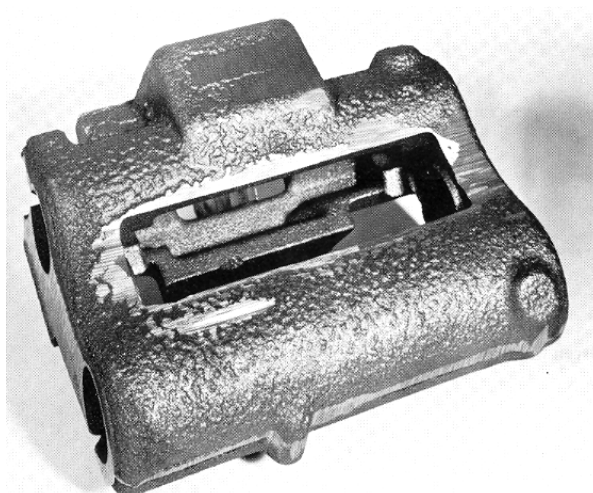


Obr.1.19 Hluboká zapečenina [19]

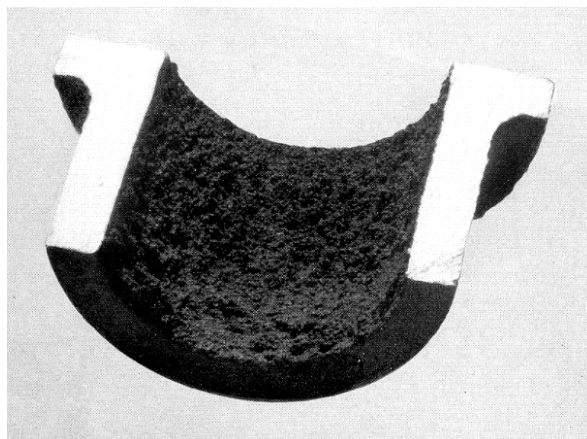
Popis vady:

Tenká vrstva nataveného písku, která pevně drží na povrchu odlitku. Tento povrch má sklovitý vzhled a může být poset droličky. Kov může vnikat do značné hloubky, často i několik centimetrů. Pórovitý konglomerát písku a kovu vzniká v silně tepelně exponovaných místech formy (jádra, dutiny) a většinou jej lze velmi obtížně oddělit od povrchu odlitku [12],[19].

Příklady:



Obr.1.20 Pouzdro, litina s kuličkovým grafitem, „směs na syrovo“ [19]

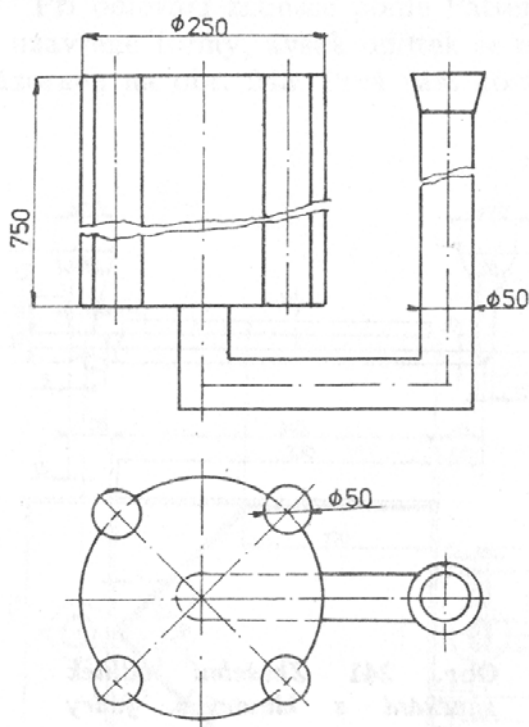


**Obr.1.21 Část tělesa ložiska, slitina mědi (bronz),  
„směs na syrovo“ [19]**



### 1.3.2 Zkušební odlitek podle Fursunda

Fursund navrhl zkušební odlitek sloupového typu [12]. Forma se skládala z válce o průměru 250 mm a výšce 750 mm (obr.1.23). Na obvodu formy se nacházely čtyři známky, umístěné rovnoběžně s osou válce. Známky jader byly vyplněny válcovými jádry. Ta se zhotovovala na laboratorním pēchovacím přístroji. Jádra měla průměr i výšku 50 mm. Každá známka obsahovala 15 jader uspořádaných nad sebou. Zkušební forma byla odlévána na stojato vtokem, zavedeným do středu dna, takže jádra byla po odlití vystavena shora dolů vzrůstajícímu metalostatickému tlaku.



**Obr.1.23 Fursundův zkušební odlitek [12]**

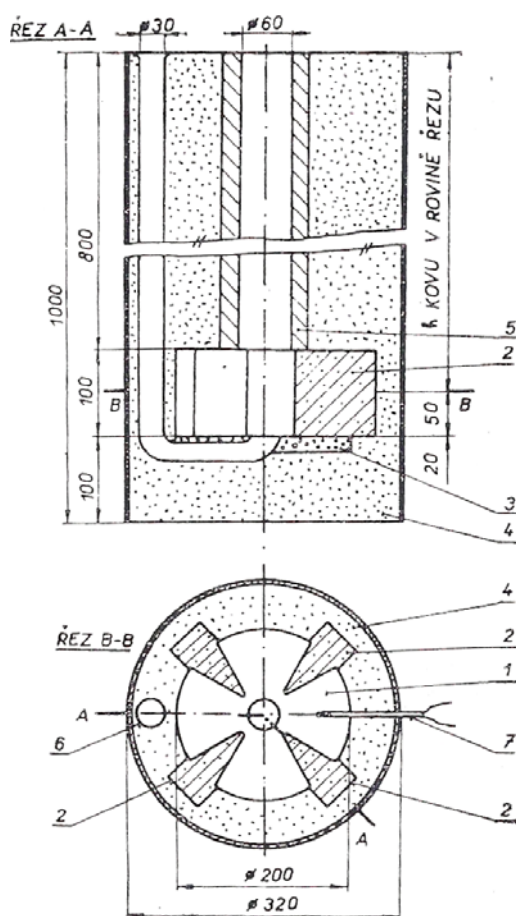
Stejný sloupový odlitek o průměru 320 mm a výšce 1200 mm použili Lopau a Hoffmeister [12]. Známky jader však byly umístěny kolmo k ose válce. Jako jádra byly rovněž použity zkušební válečky o průměru a výšce 50 mm. Do jednoho odlitku bylo tedy možno umístit 72 kusů jader.

Další variantou sloupového odlitku je Oelmann-Ungerova zkouška [12]. Tu pro podmínky těžkých ocelových odlitků zdokonalili v některých československých slévárnách.

### 1.3.3 Zkušební odlitek podle Mikšovského, Havlíčka a Bartušky

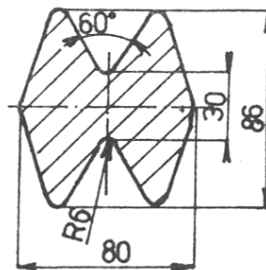
V tomto případě se jednalo o upravenou Gertsmanovu formu se speciálními klínovými jádry (obr.1.24) [12].

Nepřevážná jádra tvaru V o vrcholovém úhlu  $30^\circ$  a poloměru zaoblení 5 mm byla umístěna do formy tvaru válce o průměru 200 mm a výšce 100 mm. Konstantní metalostatický tlak byl zajišťován pomocí nálitku (nástavec o průměru 60 mm). Prodloužení doby jeho ztuhnutí bylo zajištěno šamotovou trubicí předem vyhřátou na  $300 - 400^\circ\text{C}$ . Po vychladnutí byl odlitek rozřezán rovnoběžně se základnou (tzn. 50 mm od spodu). Oblast penetrace byla studována z výbrusu metalograficky [20].



**Obr.1.24 Schéma zkušebního odlitku podle Mikšovského, Havlíčka a Bartušky [20]**

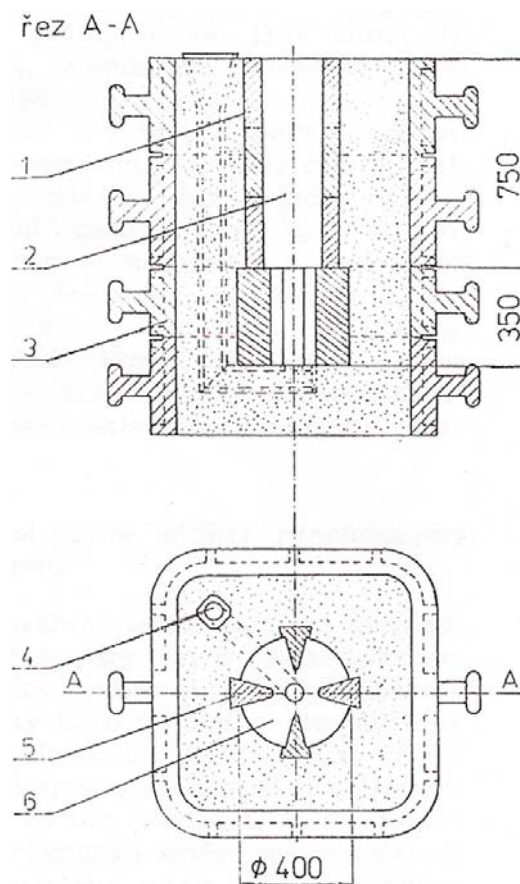
Později tuto metodu propracovali Elbel a Jelínek [11]. Kolorz a Orths použili místo válcových jader různě profilovanou formu (obr.1.25)



**Obr.1.25 Průřez zkušebního odlitku s různě profilovanými jádry [12]**

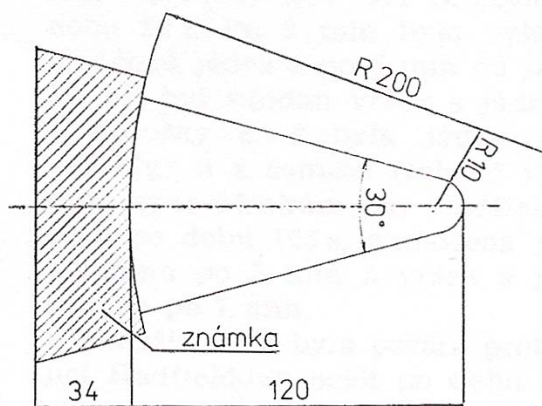
### 1.3.4 Zkušební odlitek podle Jelínka

I v tomto případě se jednalo o úpravu předcházejících zkušebních odlitků. Byl navržen odlitek tvaru válce o průměru 400 mm a výšce 350 mm se čtyřmi klínovými jádry s vrcholovým úhlem 30° (obr.1.26). Z důvodu dosažení rozdílných teplotních podmínek byly použity dva typy klínových jader- R10, R20 (obr.1.27).



**Obr.1.26 Schéma zkoušky podle Jelínka [11]**

Ke zvýšení metalostatického tlaku byl použit nálietek o průměru 200 mm a výšky 750 mm s plastizolovým obložím. Zkušební odlitky se odlévaly z oceli (ČSN 42 2643). Lití probíhalo spodem přes vtokovou soustavu z šamotových tvárnic o průměru 60 mm. Očištěné zkušební odlitky byly opět rozřezány rovnoběžně se základnou v polovině výšky jader. Zapečené části jader byly natírány roztokem  $\text{CuSO}_4$ . Vyloučená měď tak ohraničovala skutečnou hloubku zapečeniny. Zapečená plocha byla překreslována na pauzovací papír nebo fotografována. Planimetrováním byla vyhodnocena plocha zapečeniny a vztažena k celkové ploše řezu jádrem.



**Obr.1.27 Řez zkušebním jádrem  
R=10 mm [11]**

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je navržení zkušebního odlitku, na kterém se bude vyhodnocovat vliv tekuté litiny s lupínkovým grafitem na penetraci do cementových forem. Provedena bude experimentální a provozní tavba s cílem ověřit funkčnost zkoušky. U každé tavby budou výsledky porovnány s matematickým modelem mechanické penetrace.

### 2.1 Návrh zkušebního tělesa a jader

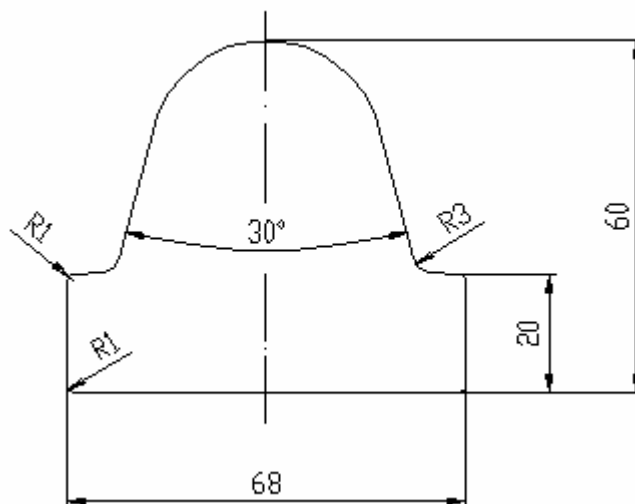
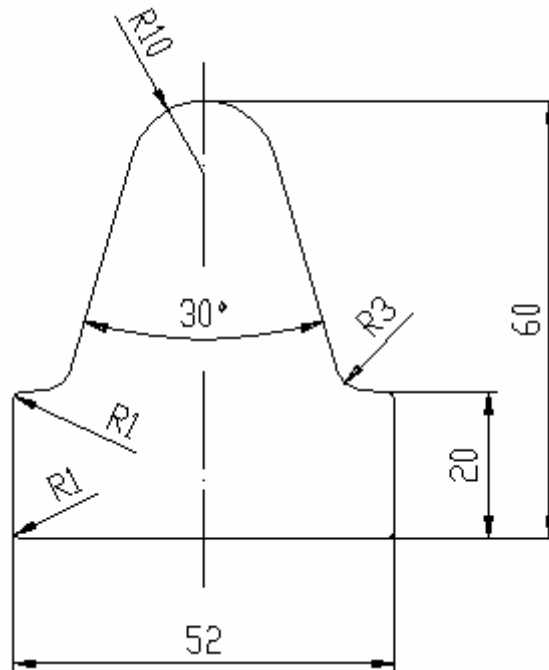
Po prostudování literatury, zabývající se zkouškami zapečenin, byla zvolena úprava zkušebního odlitku podle Jelínka [11]. Již dopředu bylo nutno počítat s omezením rozměrů pro následné řezání a čištění zkušebního odlitku (pásová pila, úhlová bruska). Byla navržena následující metodika:

1. Zkušební těleso bude válec o průměru 120 mm a výšce 150 mm.
2. K prodloužení doby tuhnutí bude vnější obálku válce tvořit sibalová (tepelná) izolace, v níž se vytvoří prostory pro uložení jader (*obr.2.1*).
3. Do sibalové izolace budou v polovině výšky izolace založena klínová jádra s rozdílnými poloměry zaoblení z důvodu dosažení rozdílných teplotních podmínek (R10, R20) - (*obr.2.2*). Jádra budou rozložena po obvodu rovnoměrně vždy po 90°. Dvojice jader se stejným poloměrem zaoblení bude založena vždy proti sobě.
4. Zvýšení metalostatického tlaku bude docíleno použitím nálitku stejného průměru jako má zkušební odlitek. Vnější obálku nálitku bude opět tvořit sibalová (tepelná) izolace.



Obr. 2.1 Tepelná izolace zkušebního tělesa

Při návrhu jader byl zachován základní tvar, který použil při své zkoušce Jelínek [11]. To znamená, že byla navržena klínová jádra s vrcholovým úhlem  $30^\circ$  a dvěma rozdílnými poloměry zaoblění špičky (R10, R20). Nicméně po zmenšení zkušebního odlitku byla i jádra proporcionálně zmenšena (obr.2.2).



Obr. 2.2 Navržené rozměry jader

## 2.2 Experimentální tavba

### 2.2.1 Výroba jader

#### Složení směsi

Ostřivo – 82,5%  
Cement 42,5N – 10%  
H<sub>2</sub>O – 4%  
Dextrin – 1,5%  
CaCl<sub>2</sub> – 2%

V jaderníku (obr.2.3) byla vyrobena celkem 4 jádra:

**Jádro 1** - R20, ostřivo Šajdíkovy Humence (příloha 1)

**Jádro 2** - R10, ostřivo Šajdíkovy Humence (příloha 1)

**Jádro 3** - R20, ostřivo Czakowa (příloha 2)

**Jádro 4** - R10, ostřivo Czakowa (příloha 2)

Na výrobu dvou jader bylo mícháno 600g směsi, 5 minut probíhalo míchání se suchými složkami (ostřivo+cement+dextrin), dalších 10 minut míchání s přidanou vodou. V té byl předem rozpuštěn chlorid vápenatý.



**Obr. 2.3** Jaderník se zaformovanými jádry

### 2.2.2 Výroba formy

Do bentonitové formovací směsi byl ručně zaformován jeden zkušební odlitek, tzn. jedna sibalová izolace se založenými jádry a další izolace tvořila nálietek. Ten byl koncipován jako atmosférický.

Pořadí jader bylo od vytvořené díry v izolačním válci (po odlití pozitiv na zkušebním odlitku) ve směru hodinových ručiček následující:

#### Jádro 1 - Jádro 2 - Jádro 3 - Jádro 4

Vtoková soustava byla vytvořena tak, aby lití probíhalo spodem (klidné plnění bez dynamického tlaku). Představme si jádra založená v izolaci, a řekněme, že těmito jádry, kolmo ke stěně izolace, prochází hlavní osy. Zářez, který plnil zkušební odlitek, byl přiveden pod úhlem  $45^\circ$  k hlavním osám jader.



Obr.2.4 Vyrobena forma

### 2.2.3 Tavení a lití

Tavení kovu probíhalo v elektrické indukční peci s kyselou vyzdívkou. Kapacita kovu v peci je 40kg. Vsázka byla tvořena vratem. Odlévána byla EN – GJL- 350 (příloha 3).

Před vlastním odlitím byl odlit do kokilky vzorek mince na rozbor (obr.2.5). Ten byl proveden na opticko emisní spektrometru s doutnavým výbojem SPECTRUMAT GDS-750. Výsledky jsou průměrné ze tří měření (tab.2.1).

Forma byla odlévána 46 hod od vyrobení jader.



Obr. 2.5 Vzorek na rozbor

$$t_L = 1302^{\circ}\text{C} \quad (\text{měřena ponorným termočlánkem})$$

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Cu    | Mg    |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| [%]  | [%]  | [%]  | [%]   | [%]   | [%]  | [%]   | [%]   |
| 2,97 | 1,76 | 0,21 | 0,068 | 0,043 | 0,05 | 0,107 | 0,000 |

Tab. 2.1 Výsledky spektrální analýzy

$$C_E = C + \frac{1}{3} \cdot (Si + P) \quad (1)$$

$$S_E = \frac{C}{4,25 - 0,3 \cdot (Si + P)} \quad (2)$$

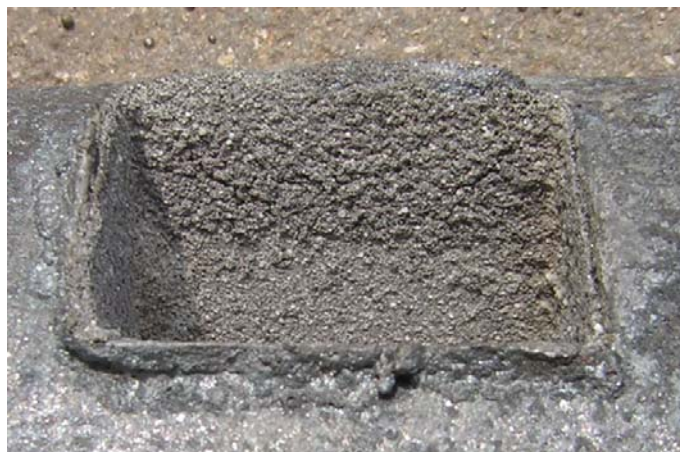
Z literatury [21] byla použita rovnice (1) pro výpočet uhlíkového ekvivalentu, a rovnice (2) pro výpočet stupně eutektičnosti (tab.2.2).

| $S_E$ | $C_E$ |
|-------|-------|
| [-]   | [%]   |
| 0,802 | 3,579 |

**Tab.2.2 Stupeň eutektičnosti  
a uhlíkový ekvivalent**

#### **2.2.4 Vytluokání a čištění**

Po vytlučení odlitku z rámu byl vnitřní prostor jader nejprve odvrtáván. Rozpadavost směsi po odlití byla velmi dobrá. Avšak po pečlivém vyčištění dutin jader zůstala na vnitřním povrchu vrstva přibližně 1-2mm tvrdé a velmi silně držící směsi (*obr.2.6*). Proto bylo přistoupeno k otryskání zkušebního odlitku (*obr.2.7*).



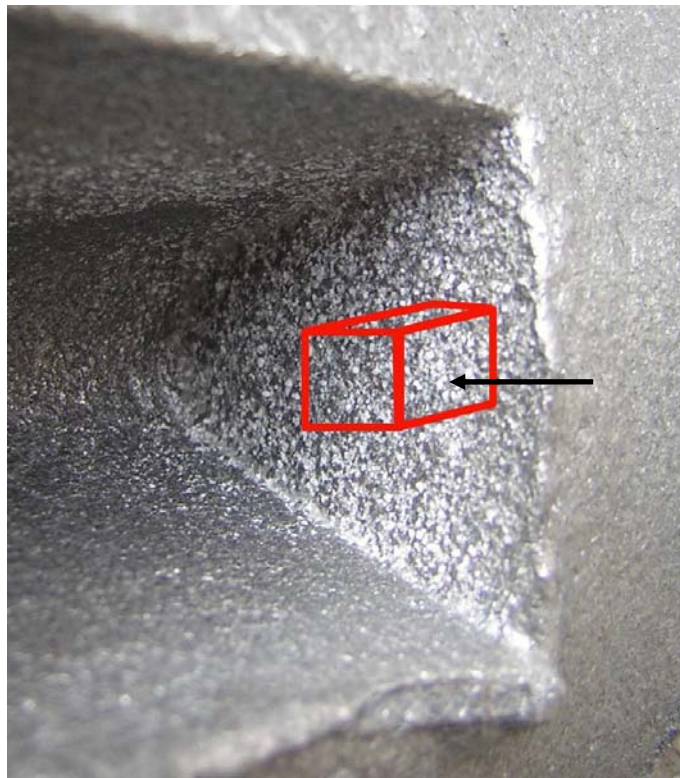
**Obr. 2.6 Pevně držící vrstva směsi**



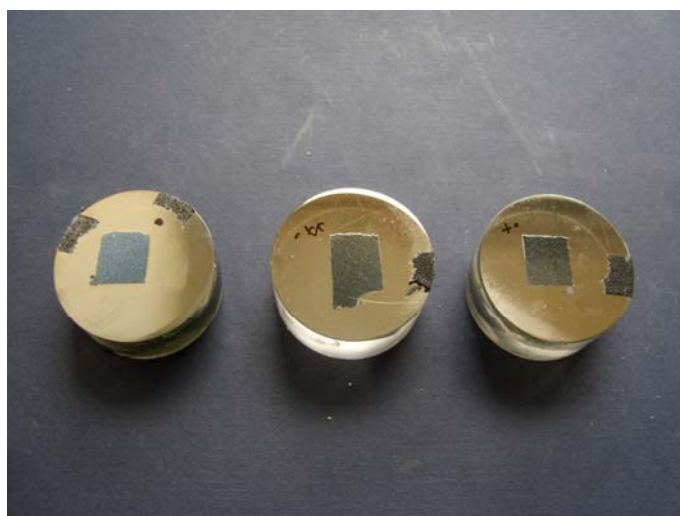
**Obr. 2.7 Otryskaná dutina**

### 2.2.5 Příprava vzorků

Z odlitku byly odebrány 3 vzorky (Jádro 1, Jádro 2, Jádro 3). Vždy ve směru kolmém k povrchu odlitku (*obr.2.8*), aby bylo možno sledovat interakce forma-kov. Vzorky byly zalisovány a na jejich povrchu připraveny metalografické výbrusy konvenčním postupem, tj. broušením za mokra na brusných papírech, leštěním diamantovými pastami (*obr.2.9*).



Obr. 2.8 Místo odběru vzorků

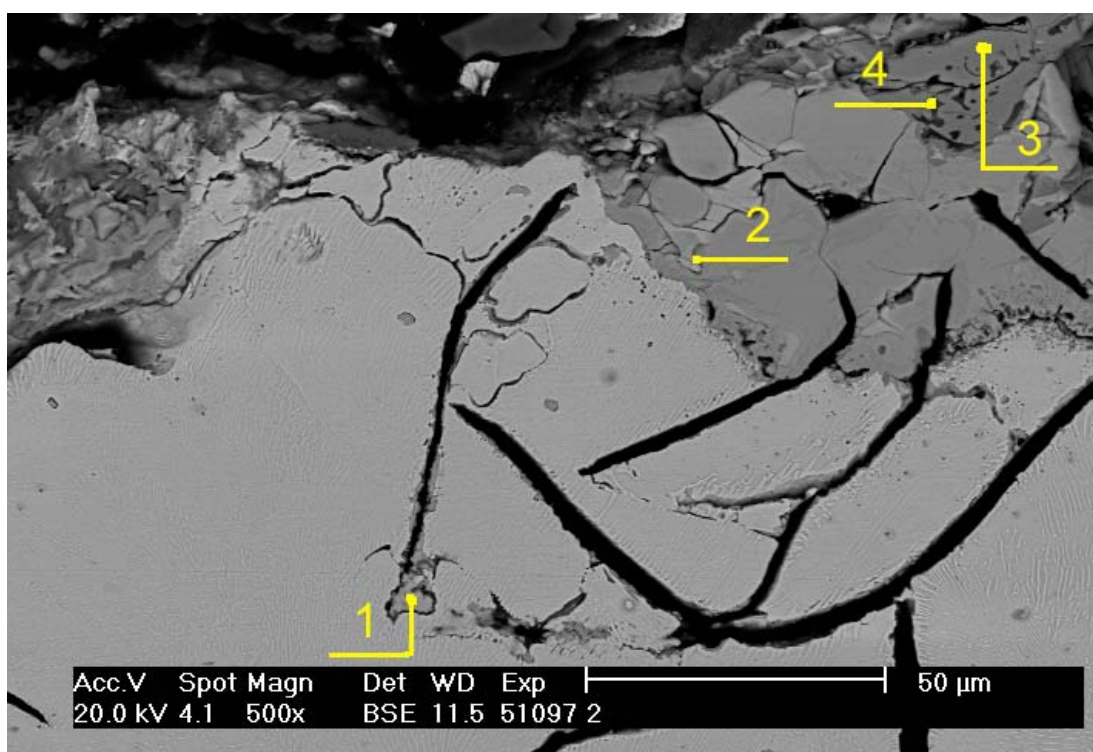


Obr.2.9 Připravené vzorky

### 2.2.6 Analýza rozhraní forma-kov

Studium a fotodokumentace struktury byly provedeny na rastrovacím elektronovém mikroskopu PHILIPS XL 30 v zobrazovacím módu BSE ( zpětně odražených elektronů). Lokální chemické analýzy byly provedeny metodou EDS (energiově dispersním spektrometrem).

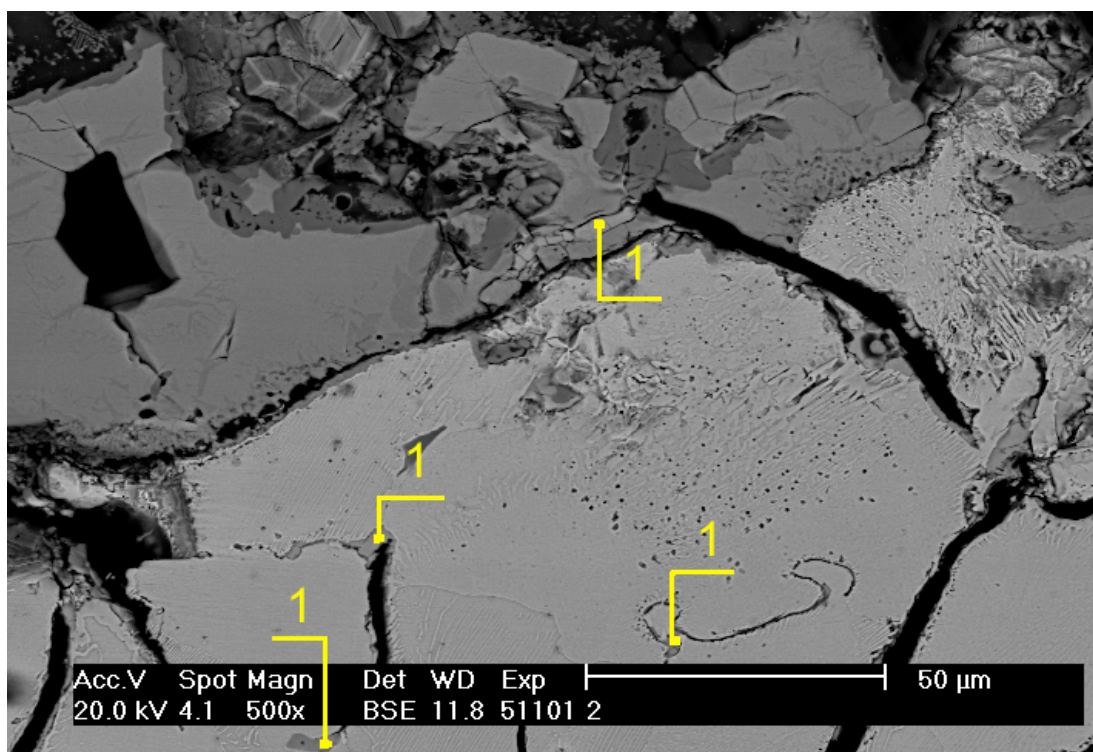
#### Jádro 1 - R20 Šajdíkovy Humence



**Snímek 51097**

| Popis analýzy |       | Prvek  |       |       |        |        |        |       |        |        |
|---------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | Cu [%] | S [%] | O [%] | Al [%] | Si [%] | Cl [%] | K [%] | Ca [%] | Fe [%] |
| 51097         | 1     | 1,15   | 49,90 |       |        |        |        |       |        | 48,95  |
| 51097         | 2     |        | 46,05 |       |        |        |        |       |        | 53,95  |
| 51097         | 3     |        |       | 56,28 |        |        |        |       |        | 43,72  |
| 51097         | 4     |        |       | 60,39 | 1,69   | 20,05  | 0,76   | 2,20  | 1,67   | 13,23  |

Na snímku 51097 v místech 1 a 2 byl analyzován FeS, v místě 3 oxid na bázi železa, a v místě 4 se jedná o komplexní oxid na bázi křemíku a železa s malým zastoupením prvků Al, Cl, K a Ca.

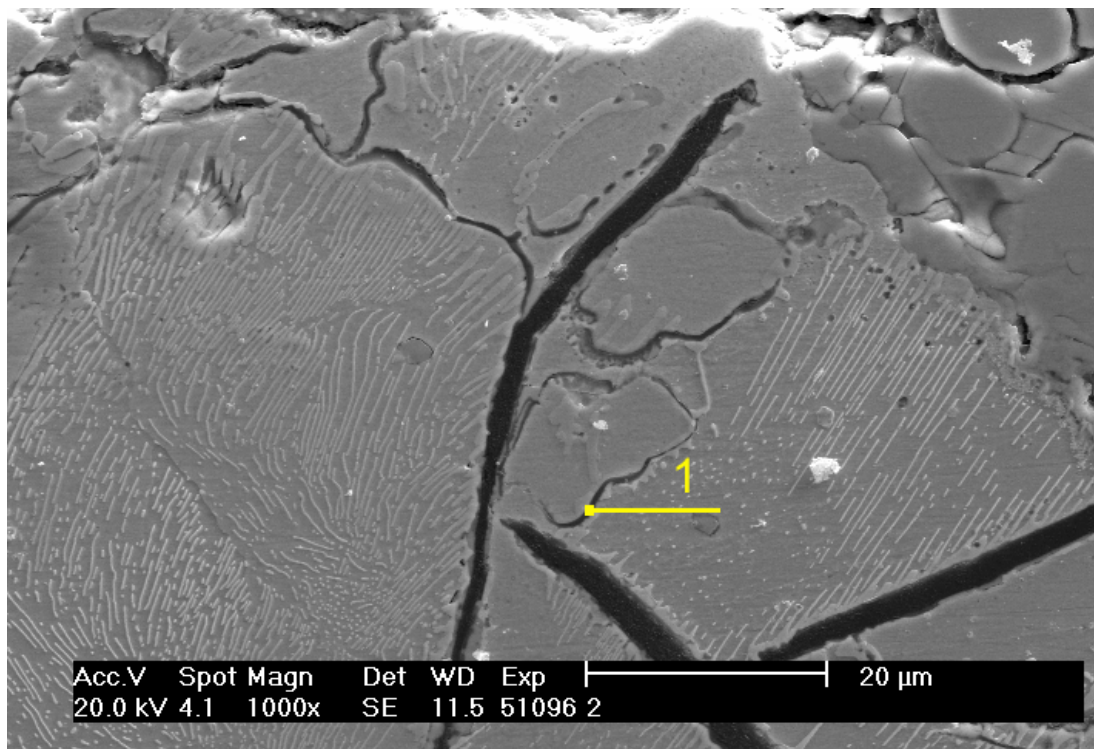


Snímek 51101

Místo 1

| Prvek | [%]   |
|-------|-------|
| S     | 47,81 |
| Fe    | 52,19 |

Na snímku 51101 můžeme pozorovat větší množství vzniklého FeS.

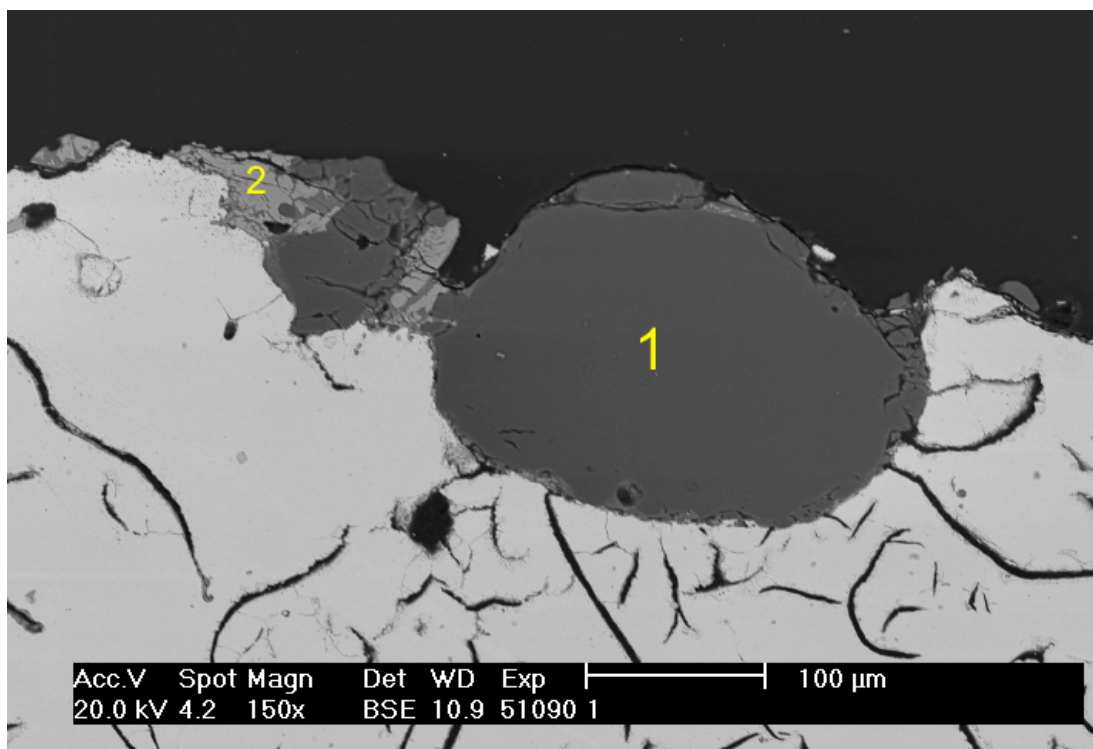


Snímek 51096

Místo 1

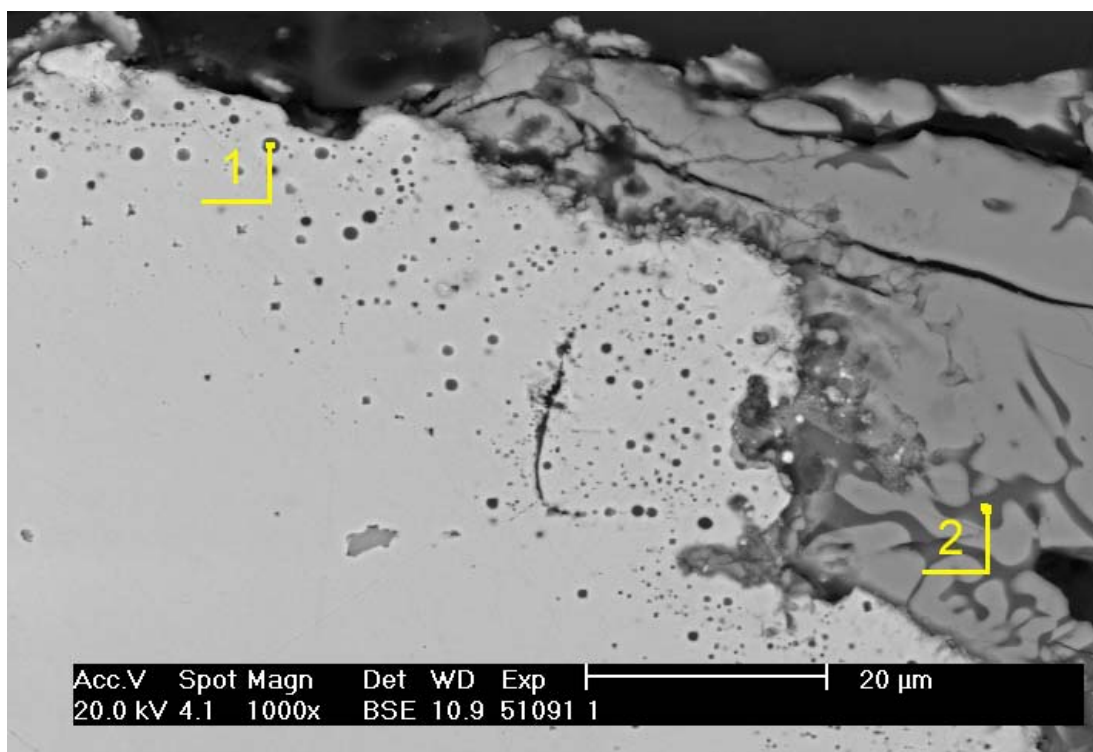
| Prvek | [%]   |
|-------|-------|
| O     | 43,05 |
| Si    | 19,07 |
| Fe    | 37,88 |

Na snímku 51096 lze pozorovat, vedle vzniklého lupínku grafitu, částici oxidu na bázi železa a křemíku.

**Jádro 2 - R10 Šajdíkovy Humence****Snímek 51090**

| Popis analýzy |       | Prvek |        |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Mg [%] | Si [%] | Mn [%] | Fe [%] |
| 51090         | 1     | 65,33 |        | 34,67  |        |        |
| 51090         | 2     | 57,93 | 1,26   | 14,03  | 0,55   | 26,24  |

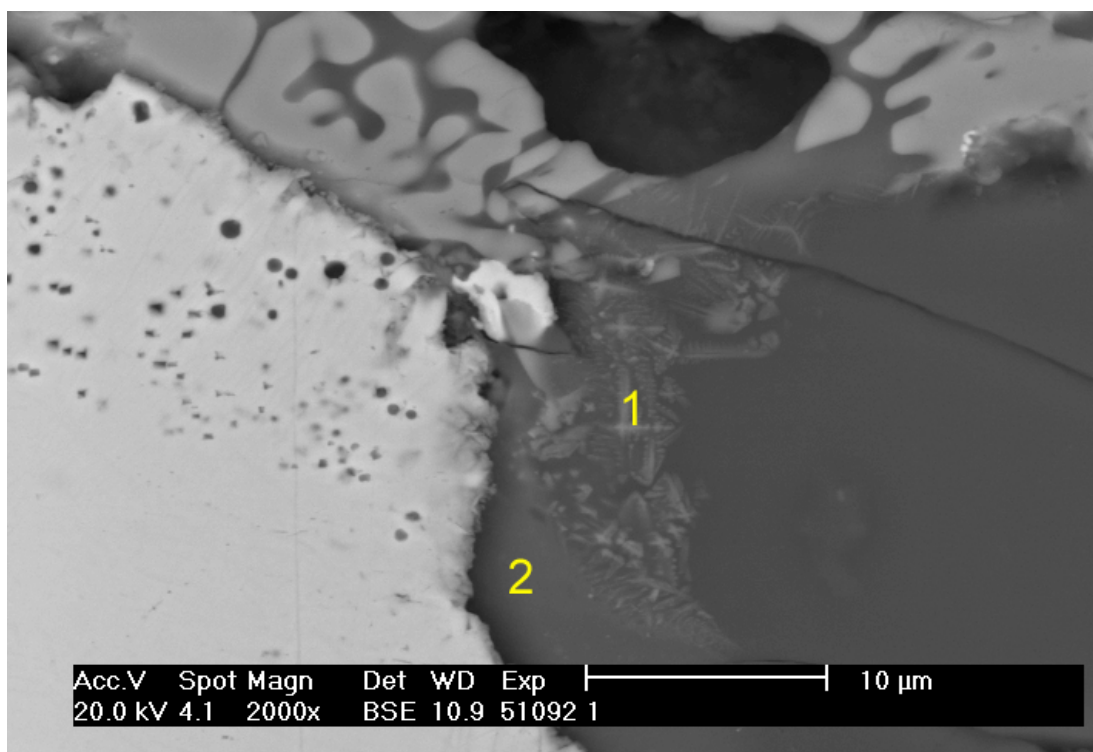
Snímek 51090 zachycuje pohled na částici křemenného ostřiva (místo 1), která pronikla do matrice hlouběji než je polovina jejího průměru. V místě 2 opět vznikl komplexní oxid na bázi železa a křemíku s malým množstvím Mg a Mn.



Snímek 51091

| Popis analýzy |       |       |        |        |       |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Al [%] | Si [%] | K [%] | Ca [%] | Ti [%] | Fe [%] |
| 51091         | 1     | 41,45 |        | 18,65  |       |        |        | 39,90  |
| 51091         | 2     | 62,06 | 6,44   | 19,58  | 0,83  | 0,95   | 0,30   | 9,85   |

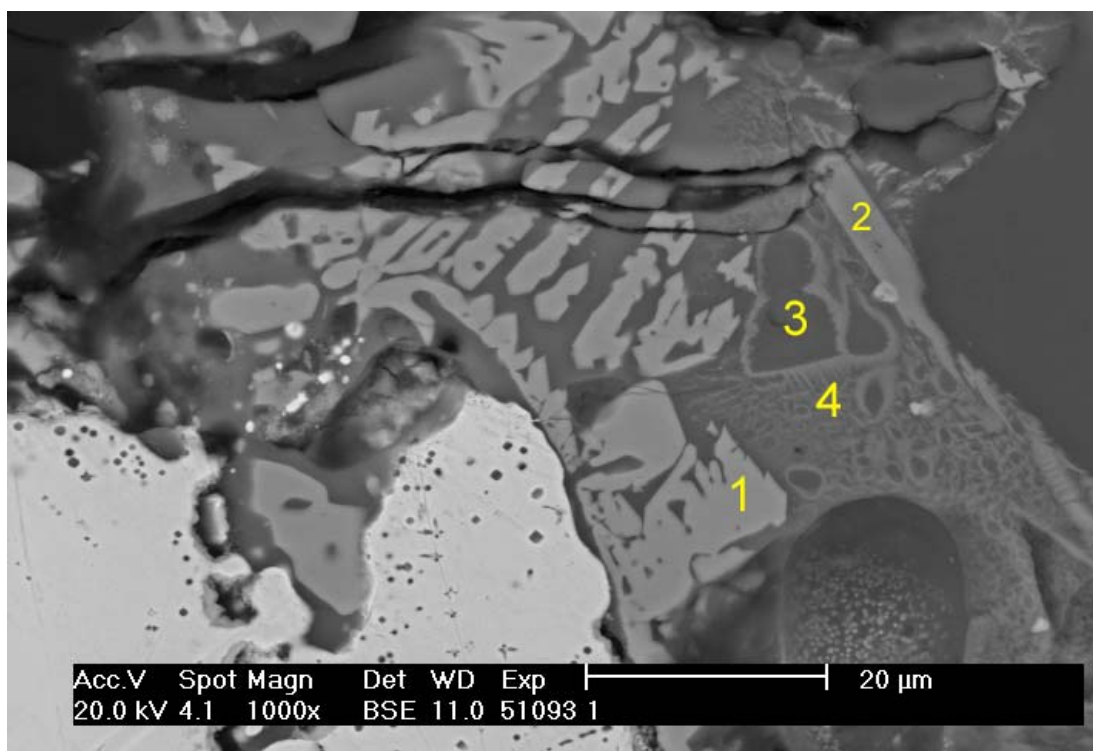
Na pravé části snímku 51091 můžeme vidět „ostrý“ přechod mezi základním materiálem a vzniklou strukturou. V místě 1 byl analyzován komplexní oxid na bázi železa a křemíku. Je vidět, že „bublinky“ komplexního oxidu se dostávají přibližně 15-20  $\mu\text{m}$  přes rozhraní do základního materiálu. V místě 2 byl opět nalezen komplexní oxid, tentokrát na bázi křemíku, železa a pravděpodobně i hliníku. V místě 2 byla analyzováno malé množství Ca, K a Ti.



Snímek 51092

| Popis analýzy |       |       |        |        |       |        |        |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Al [%] | Si [%] | K [%] | Ti [%] | Cr [%] | Ca [%] | Mn [%] | Fe [%] |
| 51092         | 1     | 63,50 | 9,53   | 21,33  |       | 0,38   | 0,54   |        |        | 4,71   |
| 51092         | 2     | 64,32 | 6,97   | 23,35  | 0,67  | 0,30   |        | 0,83   | 0,49   | 3,06   |

V místě 1 na snímku 51092 byl analyzován komplexní oxid na bázi křemíku, hliníku a železa s malým podílem Cr a Ti. V místě 2 to je opět komplexní oxid na bázi křemíku, hliníku a železa s menším množstvím K, Ti, Ca a Mn.



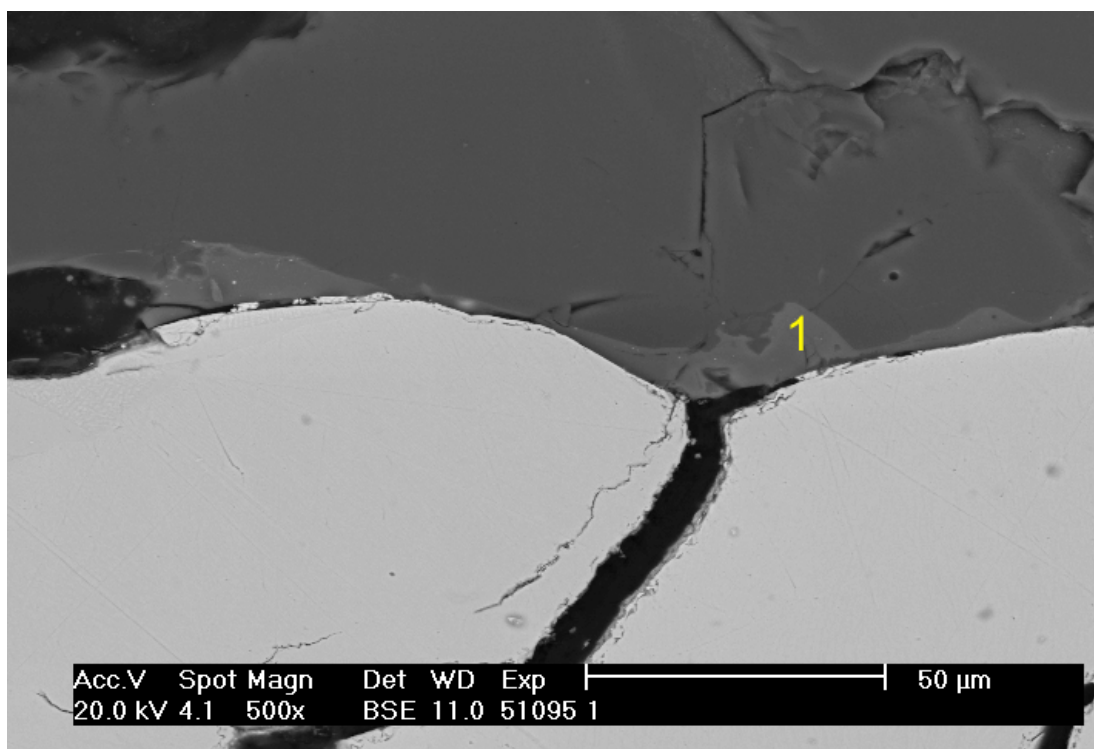
Snímek 51093

| Popis analýzy |       | Prvek |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Mg [%] | Al [%] | Si [%] | Ca [%] | Mn [%] | Fe [%] |
| 51093         | 1     | 58,82 | 2,37   | 0,72   | 14,20  |        | 1,10   | 22,78  |
| 51093         | 2     | 61,30 | 3,13   | 2,13   | 20,32  | 0,34   | 0,59   | 12,20  |

| Popis analýzy |       | Prvek |        |        |        |        |       |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Na [%] | Mg [%] | Al [%] | Si [%] | K [%] | Ca [%] | Mn [%] | Fe [%] |
| 51093         | 3     | 62,06 | 2,06   |        | 9,51   | 21,51  | 0,50  | 2,81   |        | 1,55   |
| 51093         | 4*    | 62,13 | 0,91   | 0,77   | 6,94   | 20,46  | 0,62  | 0,97   | 0,50   | 6,35   |

\* místo 4 obsahuje ještě 0,36% Ti

Na snímku 51093 je v místě 1 analyzován komplexní oxid na bázi železa a křemíku s malým podílem Mg, Mn a Al. V místě 2 to je komplexní oxid na bázi křemíku a železa s malým podílem Mg, Al, Mn a Ca. V místě 3 byl nalezen komplexní oxid na bázi křemíku a hliníku s menším podílem Ca, Na, Fe a K. V místě 4 byl analyzován komplexní oxid na bázi křemíku, hliníku a železa s malým podílem Ca, Mg, K, Mn a Ti.

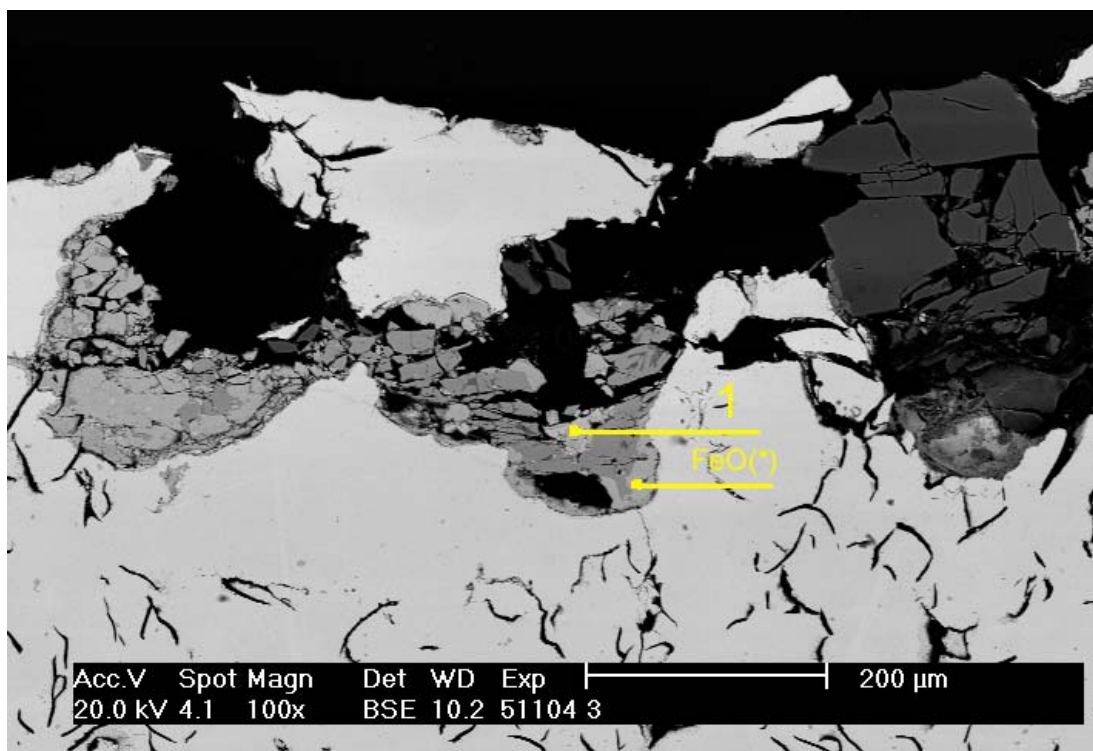


Snímek 51095

Místo 1

| Prvek | [%]   |
|-------|-------|
| O     | 63,47 |
| Mg    | 1,18  |
| Al    | 7,06  |
| Si    | 21,88 |
| K     | 0,75  |
| Ca    | 1,42  |
| Ti    | 0,42  |
| Mn    | 2,97  |
| Fe    | 0,84  |

Snímek 51095 zachycuje pohled na místo 1, v kterém byl analyzován komplexní oxid na bázi křemíku a hliníku. Ostatními analyzovanými prvky jsou: Mn, Ca, Mg, Fe, K, Ti.

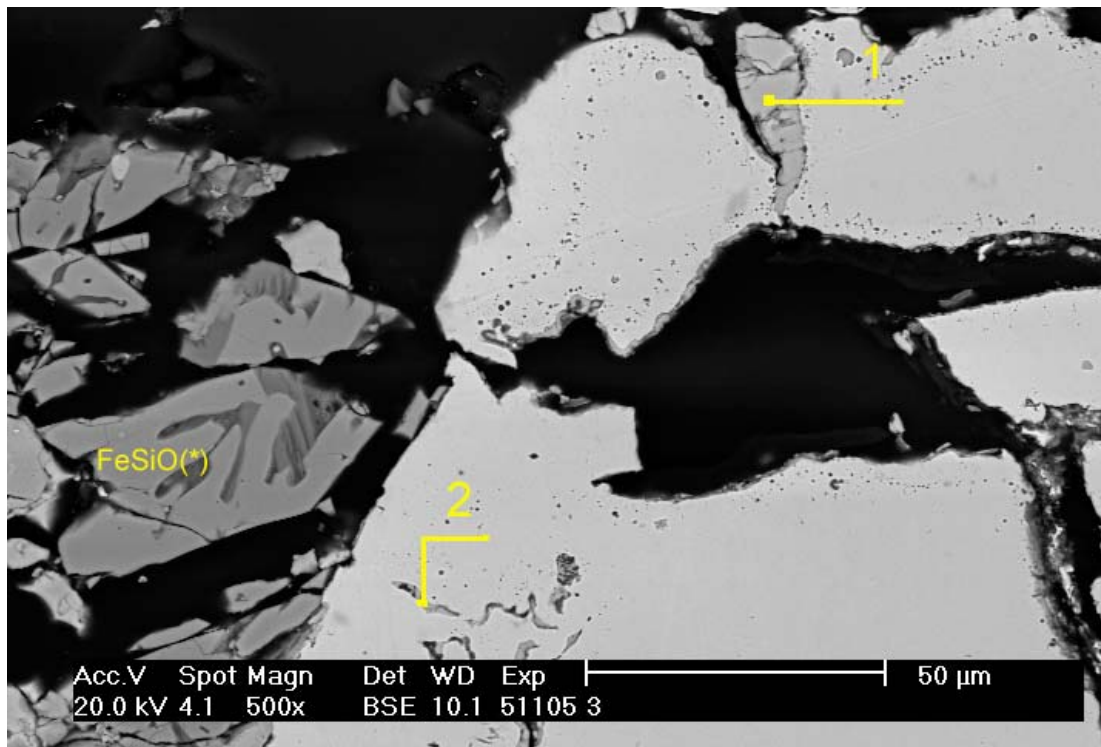
**Jádro 3 - R20 Czakowa****Snímek 51104**

\* v tomto místě je oxid na bázi železa

Místo 1

| Prvek     | [%]   |
|-----------|-------|
| <b>S</b>  | 50,58 |
| <b>Fe</b> | 49,42 |

Na snímku 51104 je v místě 1 analyzován FeS. V druhém označeném místě vznikl oxid na bázi železa. Na snímku je výborně zachycen průnik produktů chemických reakcí na rozhraní formy a kovu do samotného materiálu. Tento je pak těmito produkty zcela odtržen od základní matrice (na snímku uprostřed, více nalevo).

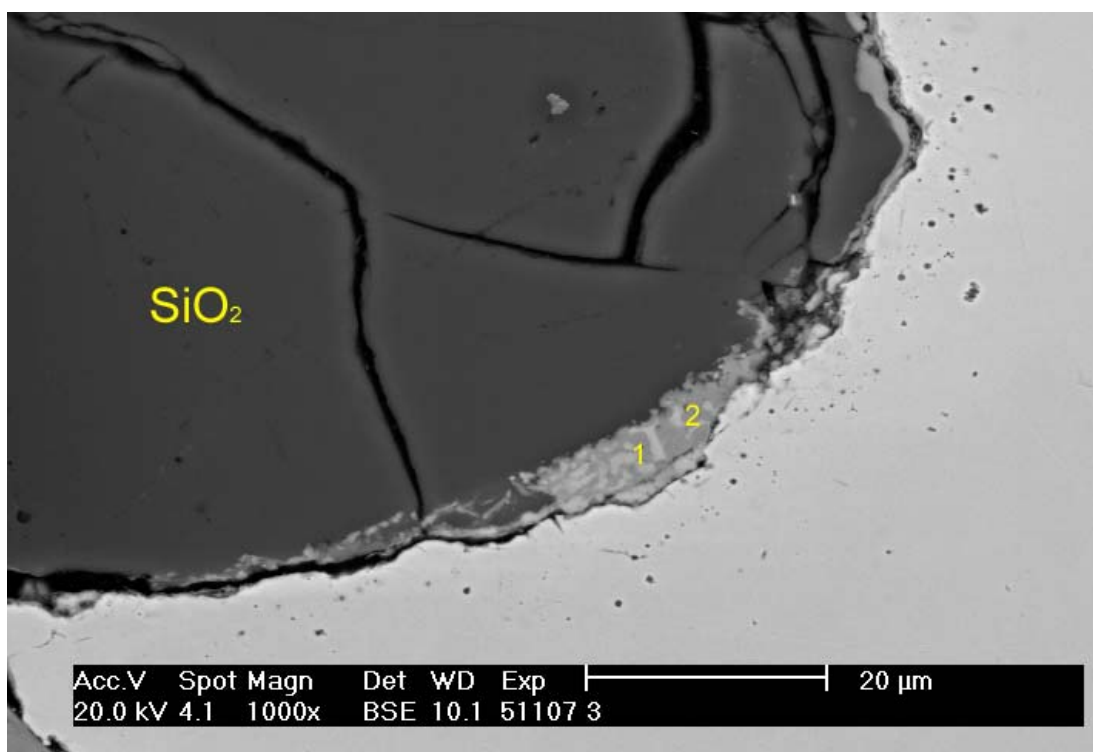


**Snímek 51105**

\* v tomto místě byl analyzován komplexní oxid na bázi křemíku a železa

| Popis analýzy |       | Prvek  |       |        |
|---------------|-------|--------|-------|--------|
| č.snímku      | místo | Si [%] | S [%] | Fe [%] |
| 51105         | 1     |        | 52,12 | 47,88  |
| 51105         | 2     | 2,62   | 39,79 | 57,59  |

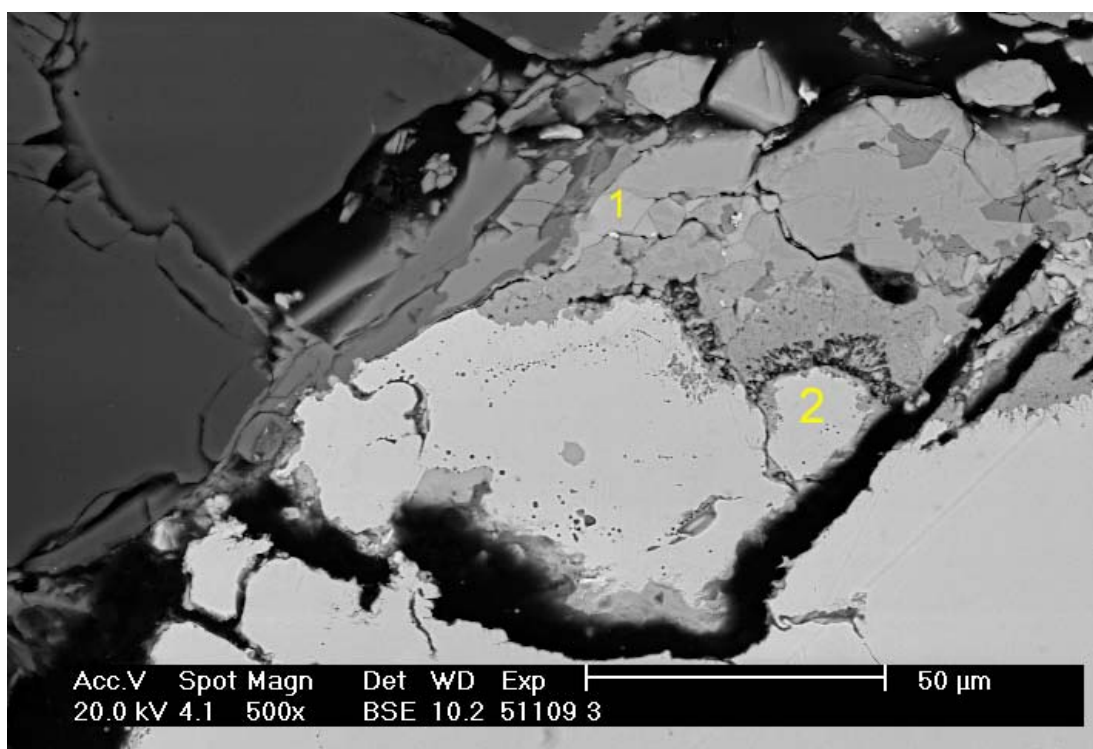
Na snímku 51105 v místě 1 a 2 je analyzován FeS. V místě 2 bylo i menší množství Si. V levé části snímku, označeném FeSiO, byl nalezen komplexní oxid na bázi křemíku a železa.



Snímek 51107

| Popis analýzy |       | Prvek |        |        |       |        |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Al [%] | Si [%] | S [%] | Ca [%] | Ti [%] | Fe [%] |
| 51107         | 1     |       |        | 7,90   | 39,88 |        | 1,02   | 51,20  |
| 51107         | 2     | 55,65 | 1,95   | 11,86  | 4,51  | 0,85   | 0,39   | 24,80  |

Snímek 51107 zachycuje pohled na zrno křemenného ostřiva, které je nataveno k základnímu materiálu. V místě 1 byl analyzován FeS s malým podílem Si a Ti. V místě 2 komplexní oxid na bázi železa a křemíku s podílem S, a menším množstvím Al, Ca a Ti.



Snímek 51109

| Popis analýzy |       |       |        |       |        |
|---------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| č.snímku      | místo | O [%] | Si [%] | S [%] | Fe [%] |
| 51109         | 1     |       |        | 50,24 | 49,76  |
| 51109         | 2     | 60,28 | 2,84   | 2,14  | 34,75  |

V místě 1 na snímku 51109 byl analyzován FeS. V místě 2 to pak je oxid železa s malým podílem Si a S.

#### Shrnutí analýzy rozhraní

Lze říci, že při odlévání do cementové formovací směsi s portlandským cementem, probíhají na rozhraní formy a kovu chemické reakce za vzniku komplexních oxidů na bázi křemíku, železa a hliníku. Zarážející je velký výskyt FeS. Ten je pravděpodobně způsoben obsahem  $\text{Ca}(\text{SO})_4$  v cementu. Síran vápenatý je přidáván buď ve formě sádrovce nebo jako anhydrit. Má funkci zpomalovače tuhnutí cementu tím, že váže rychle tuhnoucí alit. Prvky jako Si, Al, Ca a Fe mohou být uvolňovány tepelným rozkladem z produktů hydratace cementu (viz.příloha 4). V příloze 4 jsou uvedeny hlavní minerály slínku portlandského cementu, které se podílejí na hydrataci cementu. V příloze jsou rovněž uvedeny základní rovnice tuhnutí cementu.

## 2.2.7 Matematický model

Byl vytvořen zjednodušený model mechanické penetrace v programu MATHCAD 13. Tento model uvažoval vliv teploty a chemického složení dané litiny. Byla použita rovnice pro výpočet úhlu smáčení z [2] a [5]. Autoři [5] uvádějí, že tato rovnice byla sestavena pro následující rozsah podmínek (chemického složení a licí teploty):

3,04 – 3,67% C

1,74 – 2,41% Si

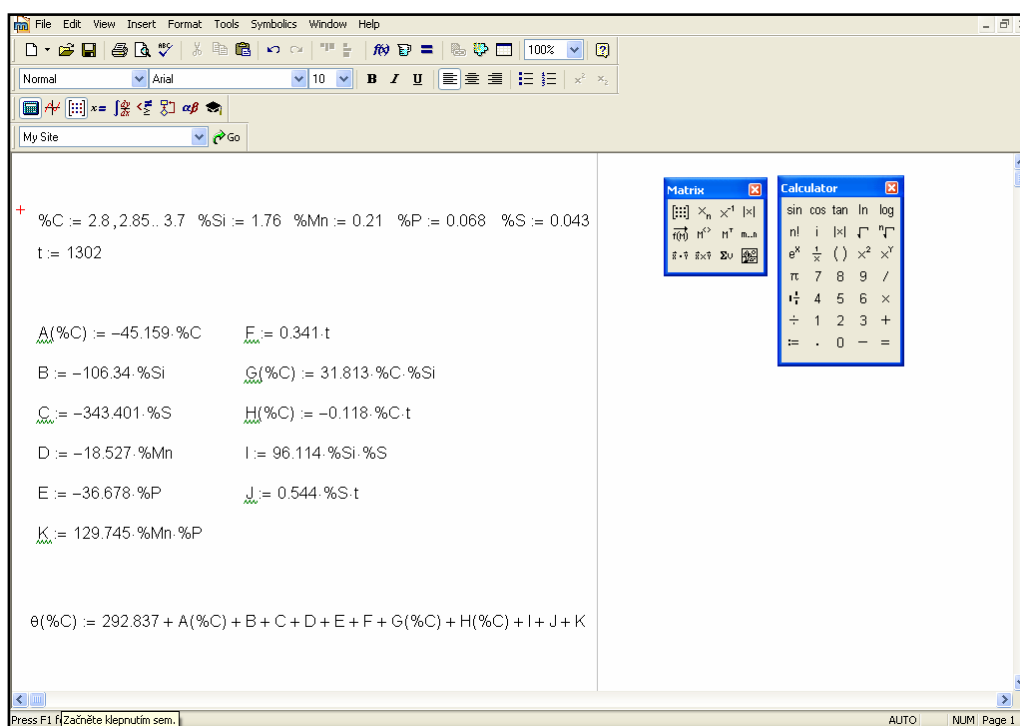
0,07 – 0,71% Mn

0,03 – 0,13% P

0,01 – 0,14% S

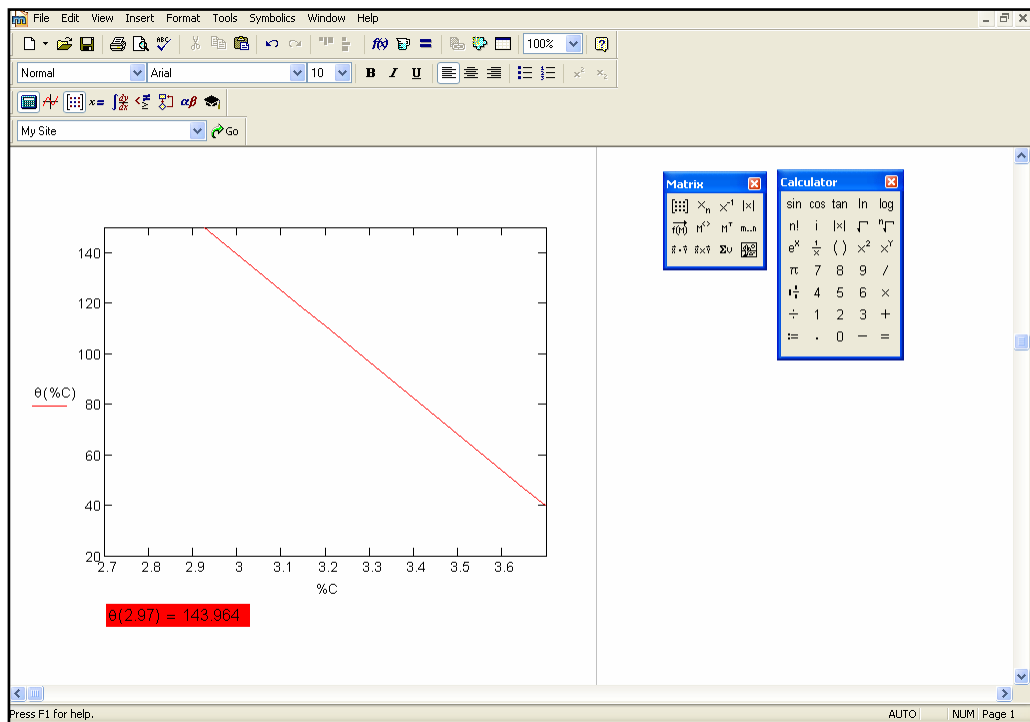
a licí teplotu v rozsahu 1300 - 1400°C

Rovnice byla použita i přes to, že chemické složení odlévaného kovu neodpovídalo rozsahu podmínek, pro který byla rovnice sestavena. Konkrétně to byl obsah uhlíku (2,97%).



Obr.2.10

Na obr.2.10 můžeme vidět definování počátečních podmínek, tzn. chemického složení kovu a teplotu lití. Použitý vztah z [5] byl rozdělen na dílčí polynomy. Ty jsou definovány a následně sečteny. Dostáváme tak závislost úhlu smáčení v závislosti na obsahu C v litině pro danou teplotu a konkrétní obsah Si, Mn, P a S.



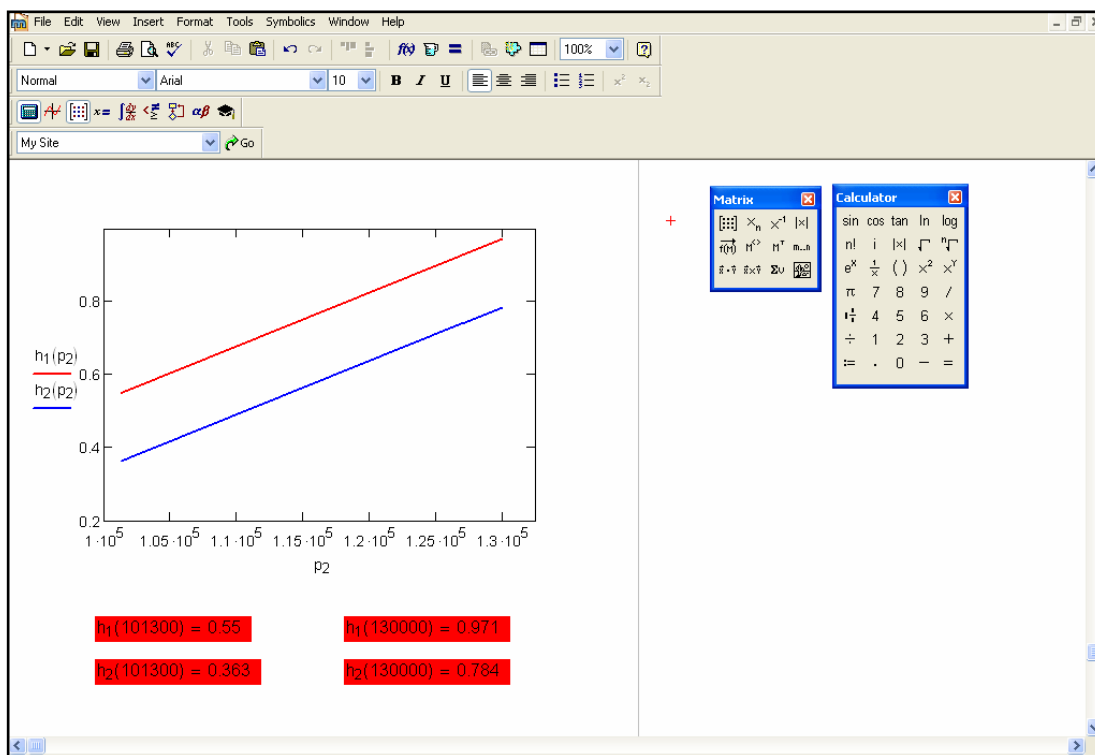
Obr.2.11

Na obr.2.11 je provedeno grafické znázornění závislosti  $\theta=f(\%C)$  a vypočtena je i hodnota pro 2,97% C.

The screenshot shows a software window with a menu bar (File, Edit, View, Insert, Format, Tools, Symbolics, Window, Help) and a toolbar. Below the toolbar is a 'Normal' style dropdown and a font size of 10. A 'My Site' dropdown is also present. The main area contains a list of variables and their values. The variables are  $p_1$ ,  $\theta_1$ ,  $d_{50A}$ ,  $r_A$ ,  $h_1(p_2)$ ,  $p_2$ ,  $d_{50B}$ ,  $r_B$ , and  $h_2(p_2)$ . The values are  $p_1 := 101300$ ,  $\theta_1 := 143.964 \text{ deg}$ ,  $d_{50A} := 0.000248$ ,  $r_A := 4.96 \times 10^{-5}$ ,  $p_2 := 101300, 101400.. 130000$ ,  $d_{50B} := 0.000376$ ,  $r_B := 7.52 \times 10^{-5}$ . The formulas for  $h_1(p_2)$  and  $h_2(p_2)$  are also shown. Two floating windows, 'Matrix' and 'Calculator', are visible on the right side of the interface.

Obr.2.12

Na obr.2.12 je definování potřebných veličin k vyjádření závislosti kritické výšky  $h$  na tlaku plynů v jádře ( $p_2$ ).



Obr.2.13

Na obr.2.13 je grafické znázornění  $h=f(p_2)$  pro formovací směs s velikostí zrna  $d_{50}=0,248$  mm (Szczakowa-pozn. červeně) a  $d_{50}=0,376$  mm (Šajdíkovy Humence-pozn. modře). Autoři [2] uvádějí že při měření tlaku plynů ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1-1,25 atm. Tlak plynů ve formě byl uvažován i v tomto modelu a jelikož jsme neprováděli žádná měření tlakového režimu u cementových formovacích směsí, tak jsem použil mezní tlaky od autorů [2]. Pro dolní mez to byla 1atm (101300 Pa) a pro horní mez 1,25 atm (130000 Pa). S rostoucím tlakem plynů pochopitelně roste i kritická výška kovu.

#### Shrnutí výsledků matematického modelu

Po vyčíslení kritických výšek pro mezní tlaky dostáváme nejnižší hodnotu 36,3 cm sloupce kovu. Tato hodnota je pro atmosférický tlak a pro velikost zrna  $d_{50}=0,376$  mm (Šajdíkovy Humence). Pokud si uvědomíme, že uspořádání experimentu bylo: výška nálitku 15cm, plus polovina výšky válce k ose jádra (7,5 cm), tak se dostáváme na hodnotu 22,5 cm sloupce kovu. I kdybychom uvažovali výšku obou izolačních válců, tak se dostáváme na hodnotu 30cm. I tato hodnota je menší než kritická výška 36,3 cm. Je patrné, že k mechanické penetraci by nemělo vůbec dojít.

## 2.3 Provozní tavba

Příprava jader probíhala na **VUT FSI**, v pískové laboratoři odboru Slévárenství. Tavení, lití, vytloukání odlitků a částečně jejich řezání bylo provedeno ve slévárně **FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o.**

Konečné úpravy, jako čištění a řezání, byly opět provedeny ve školních laboratořích.

### 2.3.1 Výroba jader

#### Složení směsi

Ostřivo – 82,5%  
Cement 42,5N – 10%  
H<sub>2</sub>O – 4%  
Dextrin – 1,5%  
CaCl<sub>2</sub> – 2%

V jaderníku (*obr.2.14*) bylo vyrobeno celkem 8 jader s označením:

- 1 směs, ostřivo Šajdíkovy Humence (*příloha 1*); R10, bez nátěru
- 2 směs, ostřivo Šajdíkovy Humence (*příloha 1*); R20, bez nátěru
- 3 směs, ostřivo Šajdíkovy Humence (*příloha 1*); R10, s nátěrem
- 4 směs, ostřivo Šajdíkovy Humence (*příloha 1*); R20, s nátěrem
- 5 směs, ostřivo Czakowa (*příloha 2*); R10, bez nátěru
- 6 směs, ostřivo Czakowa (*příloha 2*); R20, bez nátěru
- 7 směs, ostřivo Czakowa (*příloha 2*); R10; s nátěrem
- 8 směs, ostřivo Czakowa (*příloha 2*); R20; s nátěrem

Pozn. Použitý nátěr byl aplikován až před samotným litím (namočen a zapálen), charakteristika nátěru je uvedena v *příloze 5*.

Na výrobu dvou jader byl míchán 600 g směsi, 5 minut probíhalo míchání se suchými složkami (ostřivo+cement+dextrin), dalších 10 minut míchání s přidanou vodou. V té byl předem rozpuštěn chlorid vápenatý.



**Obr. 2.14** Jaderník se zaformovanými jádry

### **2.3.2** Výroba formy

Do bentonitové formovací směsi byly ručně zaformovány dva zkušební odlitky. U každého z nich těleso tvořila jedna sibalová izolace se založenými jádry a další dva izolační válce na sobě tvořily nálipek (obr.2.15, 2.16). Ten byl koncipován jako atmosférický.



**Obr.2.15** Výroba formy

**Obr.2.16 Výroba formy**

Do jader byla vyryta čísla na funkčních plochách jader, která byla uvnitř dutin odlitku. Po odlití měly vzniknout v dutinách odlitku pozitivy čísel.

**1. Válec**                    1 – 2 – 3 – 4

**2. Válec**                    5 – 6 – 7 – 8

Vtoková soustava byla vytvořena tak, aby lití probíhalo spodem (klidné plnění bez dynamického tlaku). Představme si jádra založená v izolaci, a řekněme, že těmito jádry, kolmo ke stěně izolace, prochází hlavní osy. Zářez, který plnil zkušební odlitek, byl přiveden pod úhlem 45° k hlavním osám jader (*obr.2.16*).

**Obr.2.17 Vtokový systém**

### 2.3.3 Tavení a lití

Ve slévárně FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o. přípravu tekutého kovu zajišťují dvě horkovětrné kupolové pece s odprášením o průměru tavícího pásma 1000 mm s automatickým systémem zavážení vsázky a výkonem cca 7,5 t/hod.

Kov byl do pánve přelit z 12 tunové elektrické udržovací pece PIKS, která slouží k homogenizaci tekutého kovu. Odlévána byla EN – GJL - 200 (*příloha 3*).

Forma byla odlévána 8 dnů od vyrobení jader.

$$t_L = 1467^\circ\text{C} \quad (\text{měřena pyrometrem})$$

$$\tau_L = 24\text{s}$$

Teplota lití je poměrně vysoká, nicméně autor [22] uvádí, že při vysokých licích teplotách (nad 1450°) dochází ke zmenšení nebezpečí vzniku vměstků v odlitku. Je možné, že právě toto je záměr ve slévárně FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o.

Nicméně je také možné, že se jednalo pouze o technologickou nekázeň ze strany pracovníků ve slévárně.

Spektrální analýza byla provedena na přístroji SPECTRO.

| C    | Si   | Mn   | P    | S     | Cr   | Cu   | Mg          |
|------|------|------|------|-------|------|------|-------------|
| [%]  | [%]  | [%]  | [%]  | [%]   | [%]  | [%]  | [%]         |
| 3,41 | 2,08 | 0,54 | 0,09 | 0,055 | 0,05 | 0,08 | <<br>0,0002 |

**Tab. 2.3 Výsledky spektrální analýzy**

$$C_E = C + \frac{1}{3} \cdot (Si + P) \quad (3)$$

$$S_E = \frac{C}{4,25 - 0,3 \cdot (Si + P)} \quad (4)$$

Z literatury [21] byla použita rovnice (3) pro výpočet uhlíkového ekvivalentu a rovnice (4) pro výpočet stupně eutektičnosti (*tab.2.2*).

| $S_E$ | $C_E$ |
|-------|-------|
| [-]   | [%]   |
| 0,973 | 4,13  |

**Tab.2.4 Stupeň eutektičnosti  
a uhlíkový ekvivalent**

Ačkoliv nebyl očekáván žádný větší vztlak, byla forma zajištěna závažími (obr.2.17). Vtok a nálitky byly po odlití zasypány suchou formovací směsí.



**Obr.2.18 Zajištění formy při lití**

### 2.3.4 Vytlučení, čištění a řezání

Po vytlučení odlitků a po uražení vtokového systému bylo nejprve nutné odstranit zbývající izolaci na zkušební odlitku (*obr.2.19*).



**Obr.2.19** Neočištěná zkušební tělesa s nálitky

Po odstranění tepelné izolace bylo provedeno, z důvodu transportu zkušebních odlitků na fakultu FSI, odřezání nálitků a spodních částí zkušebních těles na pásové pile (*obr.2.20*).



**Obr. 2.20** Zkušební odlitek

Po převozu zkušebních odlitků na FSI bylo zkoušeno, zda bude možné formovací směs po tepelné expozici odvrátat nebo vysekat sekáčem. Tento postup byl zcela neúčinný a proto bylo přistoupeno k otryskání zkušebních odlitků. Vnitřní prostor všech dutin byl u obou zkušebních odlitků téměř zaplněn. Nebylo zřejmé, zda došlo k tak rozsáhlé penetraci, nebo zda se jádra během lití urvala, vyplavala a prostor dutin tak byl zaplněn pouze kovem. Byl tedy rozřezán jeden zkušební odlitek v polovině výšky dutin. Bylo zjištěno, že opravdu došlo k velmi rozsáhlé a hluboké penetraci (*obr.2.21, obr.2.22, obr.2.23*). Pokud by se jednalo o kov, neexistovala by tak zřetelná hranice mezi zkušebním odlitkem a vnitřním prostorem dutiny. Jelikož se jedná o kovokeramickou hmotu, která je těžko oddělitelná, nebylo již přistoupeno k analýzám rozhraní forma-kov. Navíc nebylo možné rozlišit jádra. Pozitivní čísel, které měly vzniknout, byly zcela zapečeny. Velmi zajímavým jevem byl téměř stejný rozsah penetrace u natřených a nenatřených jader (stejného poloměru zaoblení).



**Obr.2.21 Řez zkušebním odlitkem**



**Obr.2.22 Detail zapečeni**



**Obr.2.23 Detail zapečeni**

### 2.3.5 Matematický model

Byl vytvořen zjednodušený model mechanické penetrace v programu MATHCAD 13. Tento model uvažoval vliv teploty a chemického složení dané litiny. Byla použita rovnice pro výpočet úhlu smáčení z [2] a [5]. Autoři [5] uvádějí, že tato rovnice byla sestavena pro následující rozsah podmínek (chemického složení a licí teploty):

3,04 – 3,67% C

1,74 – 2,41% Si

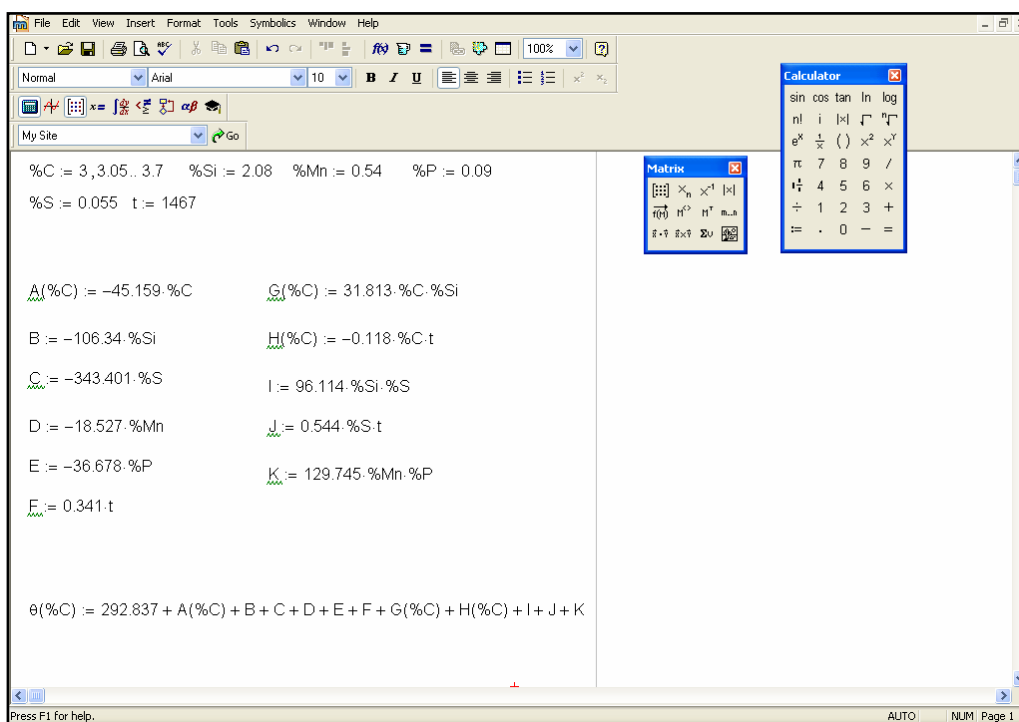
0,07 – 0,71% Mn

0,03 – 0,13% P

0,01 – 0,14% S

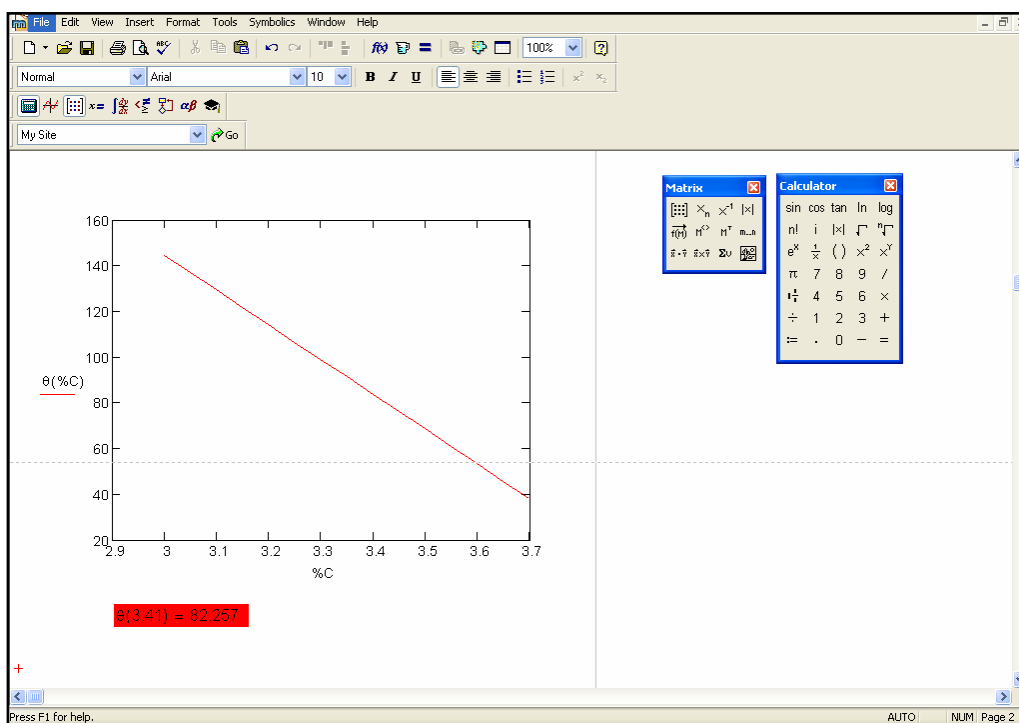
a licí teplotu v rozsahu 1300 - 1400°C

Rovnice byla použita i přes to, že licí teplota odlévaného kovu neodpovídala rozsahu podmínek, pro který byla rovnice sestavena. Konkrétně to byla teplota lití 1467°C.



Obr.2.24

Na obr.2.24 můžeme vidět definování počátečních podmínek, tzn. chemického složení kovu a teplotu lití. Použitý vztah z [5] byl rozdělen na dílčí polynomy. Ty jsou definovány a následně sečteny. Dostáváme tak závislost úhlu smáčení v závislosti na obsahu C v litině pro danou teplotu a konkrétní obsah Si, Mn, P a S.



Obr.2.25

Na obr.2.25 je provedeno grafické znázornění závislosti  $\theta=f(\%C)$  a vypočtena je i hodnota pro 3,41% C.

The screenshot shows a software window with the following parameters and formulas:

$$p_1 := 101300 \quad g := 9.81 \quad \sigma := 1.15 \quad \rho := 6950$$

$$\theta_1 := 82.257 \text{ deg} \quad p_2 := 101300, 101400.. 130000$$

$$d_{50A} := 0.000248 \quad d_{50B} := 0.000376$$

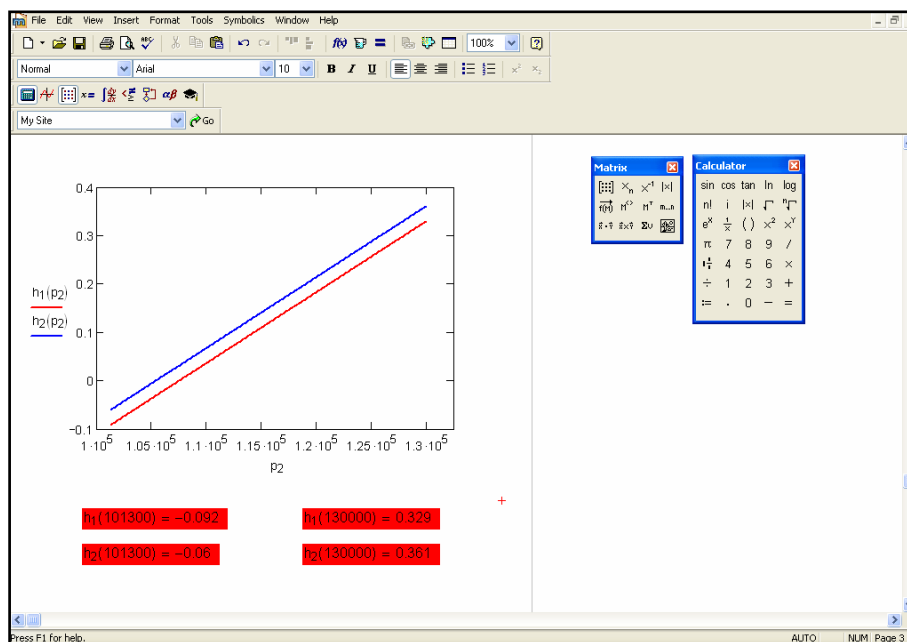
$$r_A := 0.2 \cdot d_{50A} \quad r_B := 0.2 \cdot d_{50B}$$

$$r_A = 4.96 \times 10^{-5} \quad r_B = 7.52 \times 10^{-5}$$

$$h_1(p_2) := \frac{p_2 - p_1 - 2 \cdot \sigma \cdot \frac{\cos(\theta_1)}{r_A}}{\rho \cdot g} \quad h_2(p_2) := \frac{p_2 - p_1 - 2 \cdot \sigma \cdot \frac{\cos(\theta_1)}{r_B}}{\rho \cdot g}$$

Obr.2.26

Na obr.2.26 je definování potřebných veličin k vyjádření závislosti kritické výšky  $h$  na tlaku plynů v jádře ( $p_2$ ).



Obr.2.27

Na obr.2.27 je grafické znázornění  $h=f(p_2)$  pro formovací směs s velikostí zrna  $d_{50}=0,248$  mm (Szczakowa-pozn. červeně) a  $d_{50}=0,376$  mm (Šajdíkovy Humence-pozn. modře). Autoři [2] uvádějí že při měření tlaku plynů ve formách různých směsí bylo dosahováno rozmezí 1-1,25 atm. Tlak plynů ve formě byl uvažován i v tomto modelu a jelikož jsme neprováděli žádná měření tlakového režimu u cementových formovacích směsí, tak jsem použil mezní tlaky od autorů [2]. Pro dolní mez to byla 1atm (101300 Pa) a pro horní mez 1,25 atm (130000 Pa). S rostoucím tlakem plynů pochopitelně roste i kritická výška kovu.

### Shrnutí výsledků matematického modelu

Po vyčíslení kritických výšek pro mezní tlaky dostáváme nejvyšší hodnotu 36,1 cm sloupce kovu. Tato hodnota je pro tlak 1,25 atm a pro velikost zrna  $d_{50}=0,376$  mm (Šajdíkovy Humence). Pokud si uvědomíme, že uspořádání u každého zkušebního odlitku bylo: výška nálitku 30cm, plus polovina výšky válce k ose jádra (7,5 cm), tak se dostáváme na hodnotu 37,5 cm sloupce kovu. Záměrně je na porovnání uvažována nejvyšší kritická výška i přesto, že u cementových směsí se neočekává takový tlak při vývinu plynů. Při výpočtu je použit nejvyšší tlak (1,25 atm) plynů z formy, které brání kovu proniknutí do formy. Pokud tedy porovnáme tyto dvě hodnoty: vypočtená kritická výška 36,5 cm a skutečná výška 37,5 cm, je patrné, že již od samého počátku byl kov do mezizrnových prostor nasáván, což potvrzuje výsledek uskutečněné provozní tavby.

### 3 NÁVRH DALŠÍCH EXPERIMENTŮ

Dalším krokem, ve studiu penetrace litiny s lupínkovým grafitem do cementových formovacích směsí, by mělo být zakoupení tlakového senzoru, který by měl sloužit k měření tlakového režimu cementových jader po odlití kovu [23]. Doporučuji pokračovat s experimenty i za použití hlinitanových cementů a provést větší počet taveb k ověření možnosti použití matematického modelu mechanické penetrace.

V práci [9] autoři uvádějí závislosti úhlu smáčení na čase pro různá ostřiva a různé druhy ocelí. Vypracovaný matematický model mechanické penetrace je možné s použitím dat z práce [9] aplikovat i na tuto oblast materiálů. Zároveň by bylo vhodné, z důvodu zjištění zda dochází k chemické penetraci, provést po odlití analýzu rozhraní forma-kov (PHILIPS XL 30, EDAX).

## 4 ZÁVĚR

Cílem experimentální části diplomové práce bylo vyřešit vliv tekuté litiny s lupínkovým grafitem na penetraci do cementových jader s rozdílnou granulometrií ostřiva.

V experimentální části se podařilo dosáhnout požadovaných cílů této diplomové práce. Dle teoretických a experimentálních poznatků z literatury byl navržen zkušební odlitek a kompletní metodika experimentu. Ověření probíhalo jak v podmínkách experimentálních (školní laboratoře a slévárna), tak v podmínkách provozních (FERAMO METALLUM INTERNATIONAL s.r.o.).

V rámci experimentální tavby byla provedena analýza rozhraní forma-kov, která potvrdila vznik chemických sloučenin na tomto rozhraní. Konkrétně se jednalo o komplexní oxidy na bázi křemíku, železa a hliníku. Výrazný a častý byl výskyt FeS. Jeho vznik bude pravděpodobně souviset s  $\text{CaSO}_4$  (síran vápenatý), který je přidáván do portlandského cementu jako zpomalovač tuhnutí.

Vytvořený matematický model v programu MATHCAD 13 prokázal vliv teploty lití a chemického složení tekuté litiny. S rostoucí teplotou a rostoucím obsahem uhlíku v tekuté liti se zvětšuje riziko mechanické penetrace. Výrazný je i vliv velikosti zrna formovací směsi  $d_{50}$ . Pokud je úhel smáčení větší než  $90^\circ$  je z hlediska mechanické penetrace výhodnější použití menší velikosti  $d_{50}$  (obr.2.13). Pokud je úhel smáčení menší než  $90^\circ$  je z hlediska mechanické penetrace naopak výhodnější použití větší velikosti  $d_{50}$  (obr. 2.27). Použitá rovnice pro výpočet  $\theta=f(\%C)$  byla aplikována i přes nedodržení podmínek, které uvádějí autoři [5]. I přesto v našem výpočtu byla funkční a potvrdila experimentální výsledky. Nicméně jak je uvedeno v kapitole 3 (Návrh dalších experimentů), bylo by vhodné provést rozsáhlejší ověření funkčnosti tohoto matematického modelu.

Problematika penetrace úzce souvisí s náklady na čištění odlitků. Ty často dosahují obrovských částek. Navíc při odstraňování vad způsobených penetrací vzniká velké množství prachu a ten může způsobit vážné zdravotní komplikace pracovníků v čistírně (např.silikózu). Proto je žádoucí se tímto tématem i nadále zabývat.

Tato diplomová práce měla položit základy pro doktorskou práci, která bude součástí projektu GA ČR č.106/08/270. V doktorské práci budou studovány pojiva a přísady na bázi syntetických a přírodních produktů, které mohou zlepšit nejen jakost odlitků, ale i zlepšit ekologii slévárenské výroby.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] Naro, R.L., Wallace, J.F. Effect of Mold-Steel Interface Reactions on Casting Surface. AFS Transactions, 1992, vol.100, č.95, s. 797-820.
- [2] Stefanescu, D.M., Giese, S.R., Piwonka, T.S., Lane, A.M. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I: Physics of Penetration Defects and Penetration Model. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-206, s. 1233-1248.
- [3] Draper, A.B., Gaindhar, J.L. Metal Penetration - A critical Literature Rewiev. AFS Research report, 1977, s. 164.
- [4] Stefanescu, D.M., Dellanoy, P., Piwonka, T.S. A Critical Literature Rewiev of Theories for the Formation of Casting Metal Penetration Defects. AFS Research Report, 1990, No. 2.
- [5] Giese, S.R., Stefanescu, D.M., Barlow, J., Piwonka, T.S. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II: Experimental Evaluation of Some Main Parameters Responsible for Penetration. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-207, s. 1249-1257.
- [6] Pattabhi, R., Lane, A.M., Piwonka, T.S. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part III: Measurements of Mold-Metal Interfacial Gas Composition. AFS Transactions, vol. 104, 1996, 96-208, s. 1259-1264.
- [7] Stefanescu, D.M., Owens, M.D., Lane, A.M., Piwonka, T.S., Hayes, K.D., Barlow, J.O. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling-Metal Side. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-058, s. 1347-1363.
- [8] Lane, A.M., Owens, M.D., Stefanescu, D.M., Piwonka, T.S., Barlow, J.O., Hayes, K.D. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part II: Chemical Reactions at the Mold/Metal Interface During Casting of Steel. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-057, s. 1327-1345.
- [9] Hayes, K.D., Barlow, J.O., Stefanescu, D.M., Piwonka, T.S. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part III: Experimental Evaluation of the Metal – Molding Aggregate Interaction. AFS Transactions, vol. 109, 2001, 01-083, s. 1365-1378.
- [10] Neudert, A., Duda, J. Penetrace kovu do forem ze syrových bentonitových směsí. Vady odlitků IV.-Výběr přednášek ze semináře, Česká slévárenská společnost pobočka Kopřivnice, 2000, s. 12/1-12/8.
- [11] Jelínek, P., Pawlas, P. Vliv par kovů a cristobalitické expanze na vznik hlubokých zapečenin u ocelových odlitků. Slévárenství, 1988, roč. 36, č. 10, s. 412-421.
- [12] Elbel, T. a kol. Atlas vad odlitků ze slitin železa, 1.vydání 1992, MATECS Brno.

- [13] Elbel, T. Reakce produktů reoxidace kovu se slévárenskou pískovou formou. Slévárství, 2005, roč. 53, č. 4, s. 163-168.
- [14] Rusín, K. a kol. Slévárenské formovací materiály, 1.vydání 1991. ISBN 80-03-00278-8.
- [15] Sanders, C. A. Are Carbonyls Causing Penetration and Burn-on in High Density Molds?. Modern Casting, 1965, č. 5, s. 155.
- [16] Svoboda, J. M. Mechanisms of Metal Penetration in Foundry Molds. AFS Transactions, 1969, s. 281-288.
- [17] Elbel, T., Jelínek, P. Příčiny a důsledky cristobalitické expanze směsí s vodním sklem. Slévárství, 1973, roč. 21, č. 9, s. 353-360.
- [18] ČSN EN 1370: 1998. Hodnocení drsnosti povrchu vizuálně pomocí srovnávacích etalonů. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [19] International Committee of Foundry Technical Association. Atlas of casting defects, 2.vydání 1993, ISBN 0-87433-053-X.
- [20] Mikšovský, F., Havlíček, F., Bartuška, M. Vznik fází na rozhraní forma-kov. Slévárství, 1973, roč. 21, č. 10, s. 393-396.
- [21] Roučka, J. Metalurgie litin. 1.vydání 1998, ISBN 80-214-1263-1.
- [22] Roučka, J. a kol. Filtrace tavenin, 1.vydání 2000, ISBN 80-02-01389-1.
- [23] Internetová stránka firmy Omega dostupná na: <http://www.omegaeng.cz/>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

| Zkratka/Symbol | Jednotka                                | Popis                   |
|----------------|---|-------------------------|
| $p$            | [Pa]                                    | Tlak                    |
| $\tau$         | [s]                                     | Čas                     |
| $k$            | [m.s <sup>-1/2</sup> ]                  | Konstanta tuhnutí       |
| $\xi$          | [m]                                     | Tloušťka natuhlé vrstvy |
| $b$            | [m]                                     | Úsek na ose $\xi$       |
| $\Delta H$     | [J.mol <sup>-1</sup> ]                  | Reakční teplo           |
| $T$            | [K]                                     | Teplota                 |
| $\Delta S$     | [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] | Změna entropie          |
| $\Delta G$     | [J.mol <sup>-1</sup> ]                  | Změna volné entalpie    |
| $A$            | [J.mol <sup>-1</sup> ]                  | Afinita                 |
| $t_L$          | [°C]                                    | Teplota lití            |
| $\tau_L$       | [s]                                     | Doba lití               |
| $C_E$          | [%]                                     | Uhlíkový ekvivalent     |
| $S_E$          | [-]                                     | Stupeň eutektičnosti    |
| $\theta$       | [deg]                                   | Úhel smáčení            |
| $d_{50}$       | [mm]                                    | Střední velikost zrna   |
| atm            | [-]                                     | 1atm=101 300 Pa         |

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Sítový rozbor Šajdíkovy Humence
- Příloha 2 Sítový rozbor Szczakowa
- Příloha 3 Vlastnosti litin s lupínkovým grafitem
- Příloha 4 Hlavní minerály slínku portlandského cementu
- Příloha 5 Nátěr Koalid 4087 LS

