



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV VELIKOSTI OSTŘIVA JÁDROVÝCH SMĚSÍ NA POVRCHOVOU JAKOST LITINOVÝCH ODLITKŮ

INFLUENCE OF SAND SIZE OF CORE MIXTURES ON SURFACE QUALITY OF CAST IRON CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Brůža

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. František Brůža**
Studijní program: Slévárenská technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Vliv velikosti ostřiva jádrových směsí na povrchovou jakost litinových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odlitky z litiny jsou nejčastěji odlévány do bentonitových formovacích směsí. Vnitřní dutiny v odlitku jsou vyráběny pomocí jader. Typ i jakost pojivového systému, technologie výroby a zhutnění jader, procesy vytvrzování forem mají velmi významný vliv na povrchovou jakost odlitku. S rostoucí velikostí ostřiva se zvětšují póry mezi jednotlivými zrny písku, což má příznivý vliv zejména na zvýšení prodyšnosti formovací nebo jádrové směsi. Naopak větší póry usnadňují pronikání taveniny během odlévání a tuhnutí odlitků do těchto prostor a zvýšení drsnosti povrchu. V mezním případě může docházet k proniknutí kovu do větší hloubky směsi a tvorbu vad tzv. připečenin. Tyto vady jsou sice zpravidla opravitelné, ale způsobují významné zvýšení výrobních nákladů. Cílem slévárenské technologie je zajistit pro daný tvar a velikost odlitku a navržené výrobní podmínky (chemické složení kovu, licí teplota, rychlost odlévání a podmínky odlévání atp.) co nejvyšší jakost povrchu odlitku. V některých případech je toho možné dosáhnout vhodnou technologií a velikostí ostřiva formovací a jádrové směsi. V ostatních případech jsou používány nátěry forem a jader, které zabraňují pronikání taveniny do směsi a omezují erozi formy během odlévání a tuhnutí odlitků.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je provést literární rešerši v oblasti jádrových směsí používaných při výrobě litinových odlitků jak z hlediska ostřiva, tak pojivových systémů. Součástí této rešerše je i rozbor možností zvýšení povrchové jakosti odlitků na rozhraní jádro – odlitek u chemicky vytvrzených jádrových směsí. V experimentální části práce je cílem ověřit vliv velikosti ostřiva na mechanické vlastnosti jádrových směsí a povrchovou jakost vybraných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Ověřen bude dále vliv nátěru formy na povrchovou jakost odlitku a na penetraci kovu do jádra během jejího tuhnutí.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998. ISBN 80-214-1263-1.

DOBOSZ, ST.M., K. MAJOR-GABRYS, A. GRABARCZYK. New Materials in the Production of Moulding and Core Sands. Archives of Foundry Engineering 15(4), pp. 25 - 28, 2015. ISSN 1897-3310.

STEFANESCU, D.M. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds, Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling - Metal Side. AFS Transactions, 2001, vol. 109, pp. 1347 - 1363. ISBN 0-87433-262-1.

ELBEL, T. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992, 340 s.

CAMPBELL, J. Casting, Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. ISBN 0-7506-1696-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá mechanismy vzniku vad typu připečeniny na odlitcích z litiny s kuličkovým grafitem. Řeší eliminaci jejich výskytu v podmínkách německé slévárny MAT Ueckermünde změnou granulometrie jádrového ostřiva. Následně zkoumá vliv této změny na jednotnou bentonitovou směs. Dále se práce zabývá srovnáním tří žáruvzdorných nátěrů, dodaných touto slévárnou. Nátěry jsou porovnány jednak laboratorním měřením, jednak experimentální zkouškou při odlévání v podmínkách simulujících provoz této slévárny. V závěru jsou vyhodnoceny jednotlivé zkoušky včetně vlivu jednotlivých opatření v případě jejich využití v MAT Ueckermünde.

Klíčová slova

připečeniny, penetrace, žáruvzdorné nátěry, jádra, litina s kuličkovým grafitem, cold-box

ABSTRACT

The diploma project deals with the mechanisms of burn-on casting defects on castings made of spheroidal graphite cast iron. It discusses the elimination of their occurrence in the conditions of the German foundry MAT Ueckermünde by changing the granulometry of the core sand. Subsequently, the thesis deals with the influence of this change on the greensand. Furthermore, the thesis compares three refractory coatings supplied by the foundry. The coatings are compared both by laboratory measurements and by experimental tests during casting in conditions simulating the operation of this foundry. Finally, the individual tests are evaluated, including the effect of the individual measures in the case of their use in MAT Ueckermünde.

Key words

burn-on, penetration, refractory coatings, cores, spheroidal graphite cast iron, cold-box

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRŮŽA, František. *Vliv velikosti ostřiva jádrových směsí na povrchovou jakost litinových odlitků* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139818>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Antonín Záděra.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv velikosti ostřiva jádrových směsí na povrchovou jakost litinových odlitků* vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně 20. 5. 2022

.....
místo, datum

.....
Bc. František Brůža

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za vedení práce a podporu při řešení komplikací, které v rámci ní vyvstaly, za cenné připomínky při konzultacích a za všechno co dělá pro odbor slévárenství.

Za podporu při celém studiu i mimo něj bych rád poděkoval především mým rodičům Marii Borošové a Oskaru Brůžovi, kterým za možnost studovat vděčím nejvíce. Oskaru Brůžovi patří zvláštní dík za četné jazykové korektury této práce. Za podporu také děkuji celé rodině.

Velké poděkování dále patří zvláště Ing. Michalu Tegelovi, Ph.D., bez jehož odborných rad v oblasti formovacích směsí a asistenci při výrobě jader by byla realizace této práce velmi obtížná. Dík patří i firmě ASK Chemicals Czech za poskytnutí laboratorních prostor.

Také děkuji všem ostatním, s nimiž jsem mohl práci konzultovat a kteří mi s ní nějakým způsobem pomohli.

Nakonec bych rád poděkoval všem vyučujícím, a zvláště spolužákům ze slévárenství. Ať už za pomoc při studiu, zážitky nabyté v rámci společně stráveného času, nebo celkově skvělou atmosférou, která naše studium na odboru slévárenství provázela.

OBSAH

Úvod.....	8
1 Cíle dilmové práce.....	9
2 Penetrace kovu do formovacích směsí bentonit a cold-box	10
2.1 Vady způsobené penetrací kovu do formovací směsi	10
2.1.1 Dělení vad způsobených penetrací	10
2.2 Mechanismy penetrace kovu do formovací směsi	13
2.2.1 Penetrace formovací směsi přes tekutou fázi	13
2.2.2 Chemická penetrace.....	27
2.2.3 Explosivní penetrace	32
2.2.4 Penetrace za pomoci par kovu	33
2.2.5 Penetrace způsobená cristobalitickou expanzí ostříva.....	34
2.3 Opatření proti penetraci kovu do formovací směsi	34
2.3.1 Nátěry pro formy a jádra	34
2.3.2 Úpravy formovací a jádrové směsi.....	47
2.4 Charakteristika formovacího systému JBS s jádry Cold-box.....	48
2.4.1 Pojivový systém jednotné bentonitové směsi (JBS).....	48
2.4.2 Technologie Cold-box	49
2.4.3 Ostřívo v systému Bentonit – Cold-box	49
3 Teoretické řešení experimentu.....	52
3.1 Druhy použitého ostříva a jeho vlastnosti	52
3.1.1 Vyhodnocení mineralogické čistoty použitého ostříva	52
3.1.2 Zrnitost ostříva.....	53
3.2 Odhad penetračního indexu.....	53
3.2.1 Vstupní parametry pro výpočty penetračního indexu.....	54
3.2.2 Výpočet penetračního indexu	54
3.3 Testované žáruvzdorné nátěry	57
3.4 Vliv výměny ostříva na JBS	58
3.4.1 Spotřeba bentonitu	58
3.4.2 Přebytek směsi v systému	59
3.4.3 Ovlivnění granulometrie JBS	59
3.5 Ekonomický dopad případných opatření.....	61
4 Experimentální zkoušky	62
4.1 Příprava experimentu	62
4.1.1 Návrh zkušebního jádra a odlitku	62
4.1.2 Výroba jaderníku a zkušebních jader	69
4.1.3 Výroba modelu a forem	71
4.2 Průběh experimentálních zkoušek	76
4.2.1 Laboratorní test nátěrů.....	76
4.2.2 Test vlivu změny jádrového ostříva na JBS	82
4.2.3 Praktická zkouška zapékání jader.....	83

4.3	Zhodnocení experimentálních zkoušek	86
4.3.1	Využití jader bez nátěru	86
4.3.2	Nátěr č. 1	86
4.3.3	Nátěr č. 2	86
4.3.4	Nátěr č. 3	86
5	Zhodnocení	87
5.1	Vliv změny velikosti jádrového ostříva na vznik připečení	87
5.2	Zhodnocení testu nátěrů	88
5.2.1	Nátěr č. 1	88
5.2.2	Nátěr č. 2	88
5.2.3	Nátěr č. 3	89
5.3	Vliv ostříva na JBS	89
5.4	Zhodnocení souhrnných opatření na případné úspory slévárny MAT	89
	Závěr	91
	Seznam použitých zdrojů	92
	Seznam symbolů a zkratk	96
	Seznam příloh	98

ÚVOD

Vady povrchu odlitků způsobené penetrací taveniny do formovací nebo jádrové směsi jsou běžnými vadami povrchu odlitků, objevujícími se ve slévárenských provozech s odléváním do pískových forem. V méně závažných případech může jít pouze o vady kvality struktury povrchu. V závažnějších případech může docházet k pevným propojením formovací směsi s kovem – vzniku připečenin. Přítomnost připečenin způsobuje zhoršenou obrobiteľnosť odlitků a často vede k jejich zmetkování či nákladným opravám. Jde tedy o vady, kterým je nezbytné předcházet.

Práce vznikla ve spolupráci s německou slévárnou MAT Ueckermünde. Tato slévárna je zaměřena na výrobu pro automobilový průmysl s kapacitou roční produkce až 65 000 t odlitého kovu, a to na skříně diferenciálů a brzdové třmeny (Obr. 1). Odlitky odlévá z litiny s kuličkovým grafitem na vysoce produktivních linkách Disamatic s jednotnou bentonitovou formovací směsí (JBS). Více než polovinu produkce tvoří odlitky využívající jádra vyráběná technologií Cold-box. [1]



Obr. 1 Odlitky z produkce slévárny MAT Ueckermünde. Zleva: brzdový třmen (pevná část) [2], brzdový třmen (plovoucí část) [3] a skříně diferenciálu [4].

Řešená problematika slévárny MAT Ueckermünde se týká výměny jádrového ostřiva za jemnější. Důvodem je negativní vliv hrubšího jádrového ostřiva na ožívování JBS. Tato práce studuje, zda by vlivem výměny jádrového ostřiva za jemnější mohlo být dosaženo dostatečně kvalitního povrchu odlitků i bez použití další ochrany. V současnosti jsou totiž jádra chráněna proti vadám povrchu žáruvzdornými nátěry. Pro případ, že by jemnější jádrová směs nebyla schopna zajistit dostatečně kvalitní povrch, bude vhodné v rámci experimentu otestovat různé žáruvzdorné nátěry s cílem vybrat pro dané podmínky nejvhodnější nátěr.

Smyslem práce je tedy zvláště ověřit problematiku tvorby připečenin vlivem penetrací kovu do jádrové a formovací směsi. Získané informace budou aplikovány na praktický případ výměny jádrového ostřiva v MAT Ueckermünde. Teoretické výsledky budou ověřeny pomocí experimentu, simulujícího provozní podmínky v uvedené slévárně. Zároveň budou komplexně otestovány tři nátěry dodané touto slévárnou a budou vyhodnoceny jak z hlediska ochrany proti tvorbě připečenin, tak z hlediska obecných vlastností. Zhodnoceny budou také ekonomické výsledky případných opatření při nasazení do provozu MAT Ueckermünde.

1 CÍLE DILOMOVÉ PRÁCE

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku tvorby vad typu připečeniny, které vznikají vlivem penetrace taveniny do formovací a jádrové směsi. Z hlediska odlévaného kovu je zaměřena na litiny a z hlediska formovacích směsí na JBS a polyuretanový Cold-box.

Hlavním cílem práce je komplexní rešerše problematiky a následné teoretické a experimentální ověření případné tvorby vad typu připečeniny na experimentálních odlitcích z LKG s cold-boxovými jádry. V rámci hlavního cíle práce jsou zahrnuty dílčí cíle. Těmi jsou evaluace vlivu granulometrie ostřiva na tvorbu připečenin a komplexní test žáruvzdorných nátěrů. Test nátěrů zjišťuje jejich vlastnosti a schopnost bránit tvorbě připečenin při různých hodnotách naředění. Vyhodnotit je třeba také vliv změny jádrového ostřiva na JBS vlivem regenerace jádrové směsi.

Naplnění cílů práce bude provedeno skrze:

- komplexní teoretickou rešerši problematiky tvorby připečenin na odlitcích z litiny,
- teoretickou predikci vzniku připečenin u odlitků z MAT Ueckermünde,
- test tvorby připečenin na zkušebních odlitcích se zkušebními jádry,
- laboratorní test vlastností testovaných žáruvzdorných nátěrů,
- vyhodnocení kvality struktury povrchu zkušebních odlitků s jádry opatřenými testovanými nátěry,
- teoretickou predikci vlivu změny jádrového ostřiva na JBS.

Teoretické výpočty i experimentální zkoušky, prováděné v rámci praktické části práce, budou odpovídat provozním podmínkám slévárny MAT Ueckermünde. Výsledky výzkumu budou po jeho dokončení této slévárně předány pro jejich případnou implementaci do provozu.

2 PENETRACE KOVU DO FORMOVACÍCH SMĚSÍ BENTONIT A COLD-BOX

Penetrace kovu do formovacích směsí je komplexním a složitým jevem, kdy tekutý kov proniká pod povrch formovací směsi. Tam po zatuhnutí tvoří s formovací směsí kompozitní směs, obecně nazývanou připečenina. Tato práce se zabývá konkrétně penetrací formovacího systému s jednotnou bentonitovou formovací směsí (dále JBS), zvláště pak penetrací jader vyráběných technologií Cold-box (dále CB). Výhodou jejich kombinace je, že CB směs nemá příliš negativní vliv na JBS. To umožňuje využití CB jader k oživení JBS, a proto je kombinace těchto technologií v praxi běžná. Výhodou jejich kombinace je také potenciál obou směsí pro dosažení vysoké produktivity. Proto ji lze často nalézt např. u linek firmy DISA, kde se díky ní dosahuje vysoké produktivity až přes 350 forem za hodinu.

2.1 Vady způsobené penetrací kovu do formovací směsi

Penetrace je jevem, který způsobuje vznik povrchových vad, zvaných obecně připečeniny. Při tomto jevu dochází při odlévání k proniknutí tekutého kovu do mezizrnových prostor formovací směsi. Po zatuhnutí kovu pak vznikají vady jako drsný povrch, připečeniny nebo zapečeniny, anglicky penetration nebo burn-in/burn-on. Forma penetrace a její hloubka závisí na jejím mechanismu, který může mít charakter čistě mechanického děje, charakter chemické reakce, popř. jejich kombinaci. [5; 6; 7; 8]

2.1.1 Dělení vad způsobených penetrací

V České republice v současnosti povrchové vady dělíme podle normy ČSN 42 1240 z roku 1964. Jak zmiňují autoři článku ve Slévárenství [8], tato norma není způsobem rozdělení jednotlivých vad ideální. Důvodem tohoto tvrzení je absence podrobnějšího rozdělení vad, návaznosti na evropské normy a obecně její zastaralost z hlediska popisovaných technologií. Ing. Elbel proto ve své práci *Vady odlitků ze slitin železa* z roku 1992 [5] toto dělení přepracovává. Vady jsou zde rozděleny na třídy podle druhu vady (např. Vady povrchu – 2xx, Dutiny 4xx), které jsou dále děleny na skupiny podle mechanismu vzniku vady. [5] Dalším rozdělením vad, které je všeobecně možno použít, je *International atlas of casting defects* od American Foundry Association z roku 1993 [9]. Zde je též využito rozdělení na třídy na základě druhu vady (Vady povrchu – D xxx, Dutiny – B xxx.) Jednotlivé vady jsou zde oproti práci Ing. Elbela [5] popsány spíše heslovitě. V rejstříku lze ale nalézt seznam odborných prací a článků, zabývajících se přímo studiem dané vady a jejích mechanismů. [9] Pro potřeby této práce bude primárně využito rozdělení Ing. Elbela, a to z důvodu lepšího uspořádání vad vzniklých mechanismem penetrace. [5; 6; 9]

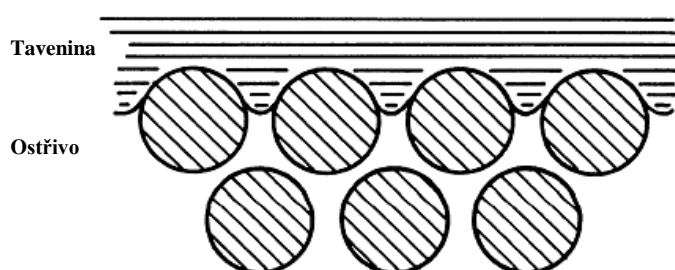
Ing. Elbel řadí ve své práci [5] vady typu připečenin do skupiny 210. Tu dále dělí podle intenzity penetrace na tři podskupiny (Tabulka 1). [5]

Tabulka 1 Dělení vad typu připečeniny podle Ing. Elbela [5].

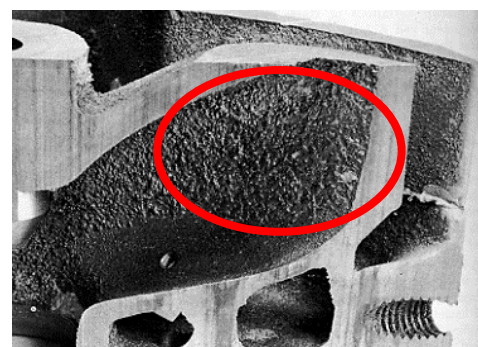
Třída vad		Skupina vad		Druh vad	
Poř. č.	Název	Poř. č.	Název	Poř. č.	Název
200	Vady povrchu	210	Připečeniny	211	Drsný povrch
				212	Povrchové připečeniny
				213	Hluboké připečeniny, zapečeniny

211 – Drsný povrch (Rough surface)

Drsný povrch je nejméně výraznou a problematickou vadou, způsobenou penetrací. Jde o vadu na povrchu odlitku, který kopíruje zrna ostřiva (maximálně) do poloviny průměru jeho zrn (Obr. 2). Je způsobena mechanickou penetrací tekutého kovu (viz. podkapitola 2.2.1) do mezizrnových prostor. Vzhledem k malé hloubce prostupu a absenci chemických reakcí mezi kovem a ostřivem není ostřivo s povrchem pevně spojeno. Vadu lze odstranit pomocí tryskání (např. ocelovými kuličkami), či obráběním. [5]



Obr. 2 Schéma vady „drsný povrch“ [10].

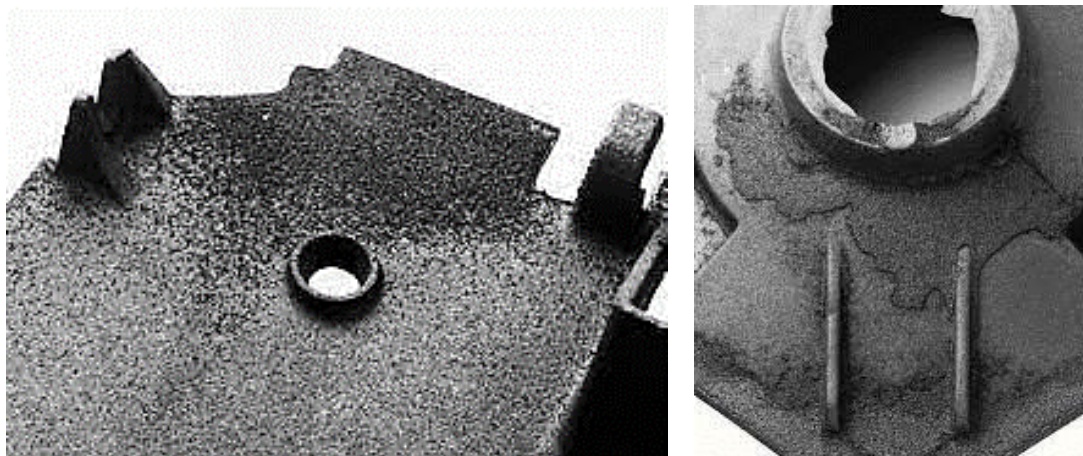


Obr. 3 Příklad vady „drsný povrch“ (místy hlubší penetrace [11]).

212 – Povrchové připečeniny (Burn-on/Burn-in)

Povrchové připečeniny lze charakterizovat jako tenkou vrstvu písku, přilnutého k povrchu odlitku. Kov zde penetruje za pomoci mechanické penetrace za průměr zrn, což vede k vytvoření tenké vrstvy „kompozitního materiálu“ složeného z kovové matrice a zrn ostřiva (Burn-on). Mimoto zde může docházet i k chemickým reakcím (viz. podkapitola 2.2.2) mezi ostřivem a kovem, vedoucím ke tvorbě sloučenin jako např. fayalit – Fe_2SiO_4 (Burn-in). Chemické reakce umocňují efekt mechanické penetrace a vedou k silnější adhezi připečenin k odlitku. V důsledku těchto mechanismů lze tuto vadu odstraňovat obtížněji než drsný povrch. Vzhledem k její malé tloušťce je ji však možno odstranit intenzivním tryskáním a broušením, přičemž náročnost těchto oprav ve velké míře závisí na intenzitě případné chemické reakce. [5; 7]

Povrchové připečeniny se často nacházejí na rovinných plochách. [5]

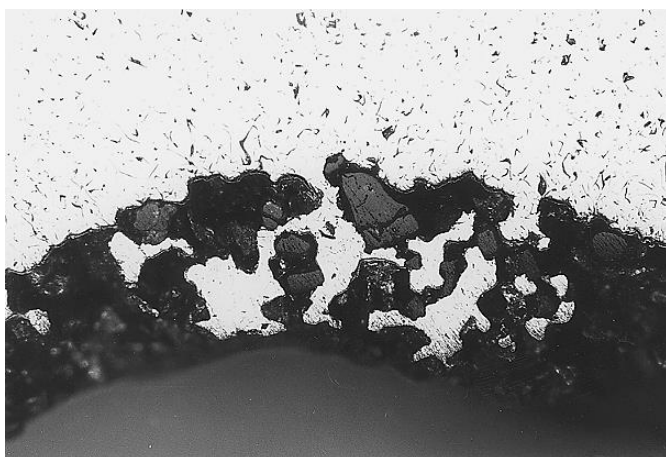


Obr. 4 Příklady povrchových připečenin [12] (vlevo), [13] (vpravo).

213 – Hluboké připečeniny – zapečeniny (Metal penetration)

Hluboké připečeniny patří mezi nejzávažnější vady způsobené jevem penetrace kovu do formovací směsi. Jsou podobné povrchovým připečeninám. Tekutý kov zde ale prostupuje do značné hloubky formovací směsi (až několik cm). Tím vzniká silná kompozitní vrstva kovu, ostřiva a případně jejich chemických sloučenin (Obr. 5). Tuto vrstvu bývá velmi náročné odstranit – využívá se zde odsekávání, broušení či upalování. [5; 7]

Hluboké připečeniny vznikají ve výrazně tepelně exponovaných místech odlitku, kde dochází k prohřátí formovací směsi na vysoké teploty, což umožňuje kovu jednodušší zaběhnutí do mezizrnových prostor. Typická místa výskytu jsou v tepelných uzlech. Příkladem mohou být části formy nebo jader, tvořící vnitřní rohy odlitku nebo dutiny (Obr. 6). [5; 7]



Obr. 5 Příklad hluboké zapečeniny do mezizrnových prostor formy [14].



Obr. 6 Příklad hluboké zapečeniny jádra [15].

2.2 Mechanismy penetrace kovu do formovací směsi

Ačkoliv je penetrace ovlivňována mnoha faktory, její mechanismy můžeme rozdělit do šesti kategorií. Nutno ovšem podotknout, že při samotném procesu penetrace se často uplatňuje více mechanismů současně a jednotlivé mechanismy se vzájemně ovlivňují. [5]

Nejvýznamnějším mechanismem je mechanická penetrace přes tekutou fázi kovu, která stojí přibližně za 75 % vad typu připečeniny. Na druhém místě je penetrace za spoluúčasti chemických reakcí mezi kovem a ostřivem. Tento mechanismus je stěžejním přibližně ve 20 % vad typu připečeniny. Zbylých 5 % je pak rozděleno mezi explozivní penetraci (výskyt pouze v případě bentonitových směsí), penetraci pomocí par kovu, penetraci vycezováním (penetrace vlivem objemových změn při eutektické přeměně grafitických litin) a penetraci způsobenou cristobalitickou expanzí křemenného ostřiva. [6; 5]

2.2.1 Penetrace formovací směsi přes tekutou fázi

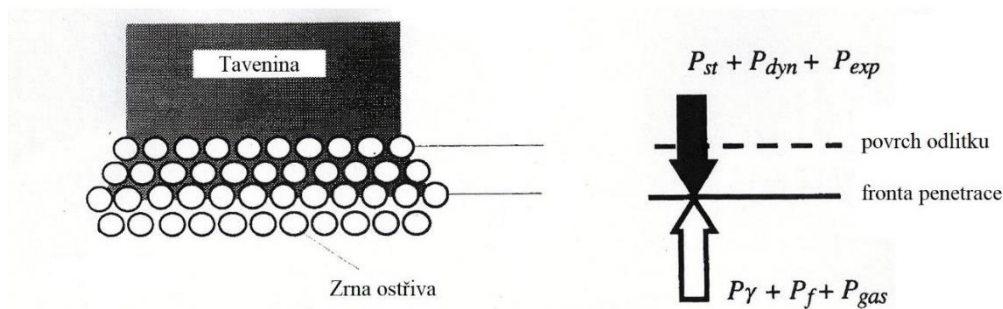
Jde o mechanismus, při kterém dochází k transportu tekutého kovu mezi zrna ostřiva formy. Tekutý kov je do mezizrnových prostor tlačěn především metalostatickým tlakem kovu a dynamicky při plnění formy, kdy tryská ze zářezů na povrch formy či jádra. V případě litin se zde může uplatnit i tlak vyvolaný expanzí grafitického eutektika. Oproti tomu proti kovu působí ze strany formy tlak kapilární, tlak vyvolaný třením mezi kovem a zrny ostřiva a tlak vyvolaný plyny z formy/jádra při jejich tepelném ovlivnění tekutým kovem.

Vzhledem k podílu jednotlivých tlaků na výsledné penetraci kovu se nabízí vytvoření rovnice rovnováhy na rozhraní kov-forma právě pomocí jednotlivých tlaků ve formě [16; 6]:

$$P_{met} + P_{dyn} + P_{exp} = P_{\gamma} + P_{gas} + P_f \quad [Pa] \quad (1)$$

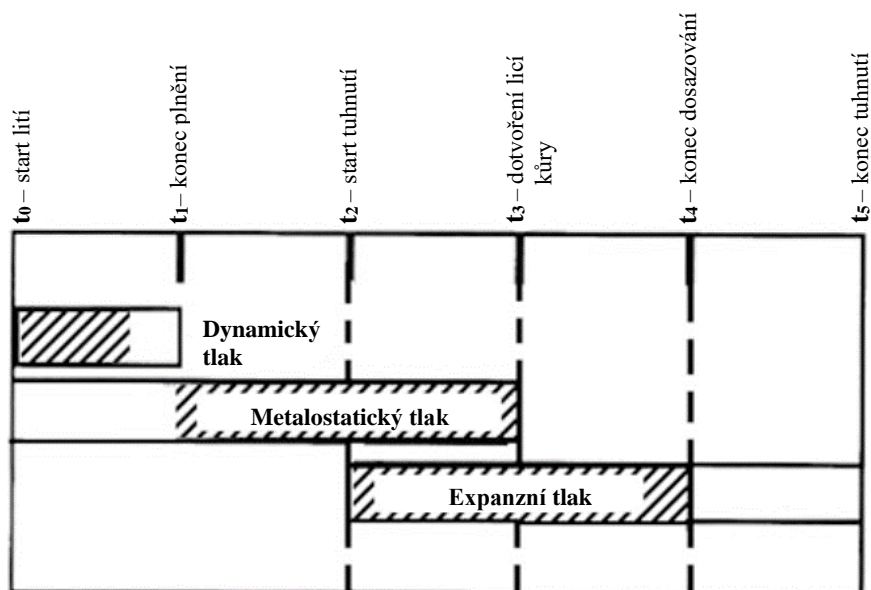
- kde: P_{met} – metalostatický tlak kovu [Pa],
 P_{dyn} – dynamický tlak [Pa],
 P_{exp} – tlak od expanze grafitického eutektika v litinách [Pa],
 P_{γ} – kapilární tlak [Pa],
 P_{gas} – tlak od plynů formy [Pa],
 P_f – ztráta tlaku vlivem tření mezi kovem a formou [Pa].

Na levé straně rovnice lze vidět parametry ovlivňující snahu kovu o proniknutí do formy, na pravé straně oproti tomu tlaky působící proti této snaze (grafické znázornění viz. Obr. 7). Pokud bude tedy levá strana převažovat, bude docházet k penetraci formy. Je zde nutno upozornit, že P_{exp} na levé straně rovnice je charakteristický pouze pro litiny, kde dochází k tvorbě grafitického eutektika. U ocelí a případně neželezných kovů tudíž tento člen z rovnice vypadává. [16; 5]



Obr. 7 Tlaková rovnováha na rozhraní forma-kov. Nahoře tlaky podporující penetraci taveniny do prostor formy, dole tlaky působící proti tavenině [17].

Jelikož mechanismy penetrace přes tekutou fázi nepůsobí všechny ve stejném okamžiku, je vhodné je také rozdělit podle času, kdy k nim dochází. Na obrázku níže (Obr. 8) lze vidět grafické znázornění tohoto rozdělení. Na počátku lití podporuje penetraci kovu především dynamický tlak, vznikající vlivem proudění taveniny. Po naplnění formy se stává hlavním faktorem metalostatický tlak, působící od vtokové soustavy. Tento tlak působí až do dotvoření licí kůry. V případě grafitických litin může po dobu tuhnutí ještě působit tlak, způsobený expanzí grafitického eutektika. Ten působí převážně do ukončení dosazování, v některých případech může mít vliv až do konce tuhnutí (viz. dále).



Obr. 8 Mechanismy penetrace tekuté fáze v závislosti na čase od startu lití [6].

Kapilární tlak

Kapilární tlak má největší vliv na rovnici rovnováhy na rozhraní kov-forma (1), a to zvláště proto, že jeho schopnost oponovat tlakům od tekutého kovu je úměrně závislá na smáčivosti formy kovem.

Principem vzniku kapilárního tlaku je vznik povrchového napětí na povrchu kapalin. Uvnitř kapalin na sebe vzájemně působí jednotlivé sobě si podobné atomy silami, které jsou ve vzájemné rovnováze. Oproti tomu na atomy v povrchové vrstvě kapalin na rozhraní fází (kapalné/pevné nebo kapalné/plynné) jsou vystaveny působení jiných sil, než jsou síly ze strany kapaliny. Z toho vyplývá, že atomy na povrchu jsou ke zbytku kapaliny přitahovány jinou silou než atomy ostatní. Tento jev se nazývá povrchové napětí.

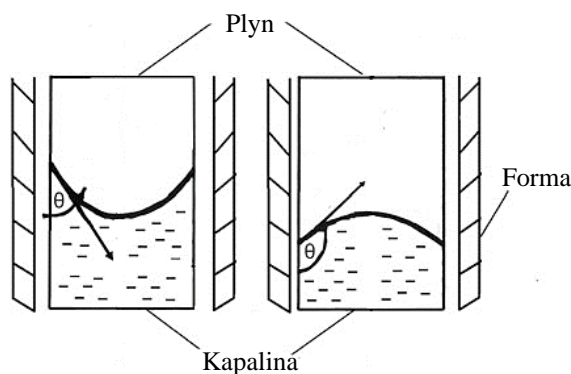
Pokud je kapka kapaliny přítomna na pevném podkladu, je tvar kapky určen poměrem sil (napětí), kterými na sebe vzájemně působí jednotlivá skupenství – pevný podklad, kapka kapaliny a plynná atmosféra v okolí. Kapalina se vždy bude chovat tak, aby minimalizovala nutné povrchové napětí, díky čemuž má vždy snahu vytvořit sféru. Vzhledem k přítomnosti gravitační síly je ale sféra deformována na částečnou elipsu. Napětí na povrchu kapky je charakterizováno Youngovou rovnicí [16]:

$$\gamma_{LV} * \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{LS} \text{ [J/m}^2\text{]} \quad (2)$$

- kde: γ – povrchová napětí na rozhraní daných fází (Liquid – kapalná, Vapor – plynná, Solid – pevná) [J/m²],
 θ – kontaktní úhel mezi kapalinou a pevným podkladem [°].

Úhel, který charakterizuje tvar kapky, je nazýván úhel smáčení nebo také kontaktní úhel. Jeho velikost se určuje experimentálně a vyjadřuje se jí smáčivost daného povrchu danou kapalinou. Pokud je úhel smáčení větší než 90°, nazýváme povrch nesmáčivý (metalofobní) a kapalina na něm tvoří kapky, pokud je menší než 90°, je povrch smáčivý a kapalina na něm tvoří čočku.

Ve chvíli, kdy je do kapaliny zavedena kapilární trubice (a úhel smáčení není roven 90°), dochází k následujícímu efektu: kapalina smáčející kapiláru je do ní po stěnách nasávána a její hladina je konvexního tvaru (Obr. 9 vlevo). Naopak nesmáčející kapalina bude z kapiláry vypuzována ven a její hladina bude konkávního tvaru (Obr. 9 vpravo). [6; 16]



Obr. 9 Vliv úhlu smáčení na chování kapaliny v kapiláře. Vlevo $\theta < 90^\circ$ (např. rtuť), vpravo $\theta > 90^\circ$ (např. voda) [6].

Tlak, který působí v danou chvíli na taveninu a tlačí ji do nebo z kapiláry, je tlak kapilární. Jeho velikost je určena rovnicí [6]:

$$P_{pen} = -2 * \sigma_{LV} * \cos\left(\frac{\theta}{d_p}\right) [Pa] \quad (3)$$

kde: P_{pen} – kapilární tlak bránící penetraci [Pa],
 σ_{LV} – povrchové napětí mezi plynnou fází a kapalinou [N/m],
 θ – úhel smáčení [°],
 d_p – průměr kapiláry/pórů [m].

Z výše popsané rovnice je patrné, že úhel smáčení u kapilárního tlaku ovlivňuje nejen jeho velikost, ale zvláště směr jeho působení. V případě smáčivého povrchu tedy nejenže nepůsobí proti tlakům, které tlačí kov do mezizrnových prostor, ale naopak dochází k podtlaku, který pronikání kovu napomáhá. Smáčivost, resp. kapilární tlak, je tedy faktorem, který je v případě penetrací stěžejní.

Velikost úhlu smáčení závisí na několika vzájemně nezávislých faktorech. Těmito faktory jsou lící teplota, složení kovu, složení formovací směsi a také složení atmosféry ve formě. Tyto faktory jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách. [18]

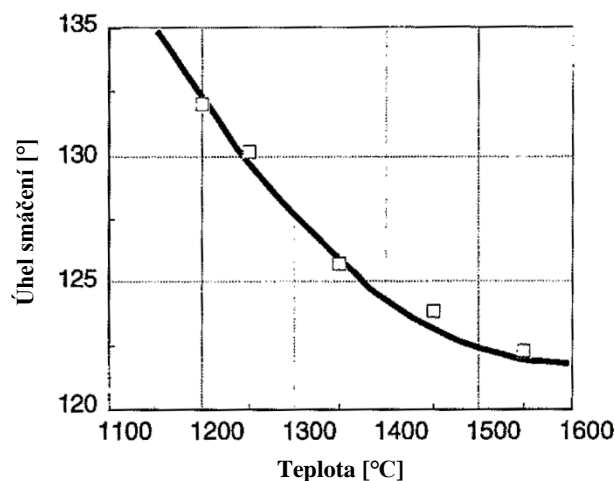
• Vliv lící teploty na úhel smáčení

Při zvyšování teploty přehřátí taveniny se snižuje velikost úhlu smáčení. Tento jev je způsoben zvýšenou frekvencí vibrací atomů v povrchové vrstvě. Meziatomární síly se tím snižují a dovolují větší roztažení povrchové vrstvy. Tím dochází ke snížení povrchového napětí kovu a spolu s tím i ke snížení úhlu smáčení. Efekt přehřátí má podle autorů práce *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [18] téměř lineární průběh a ve zmíněné práci je vyjádřen rovnicí:

$$\cos \theta = 1 + k_1 * (T - T_{cs}) \quad (4)$$

kde: k_1 – sklon závislosti úhlu smáčení na teplotě,
 T_{cs} – kritická teplota, kdy se úhel smáčení blíží nule,
 θ – úhel smáčení [°].

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že je vhodné odlévat kov s co nejmenší možnou teplotou přehřátí. Vliv samotné teploty přehřátí je zároveň ovlivňován i chemickým složením kovu, proto je třeba brát v potaz oba faktory současně.

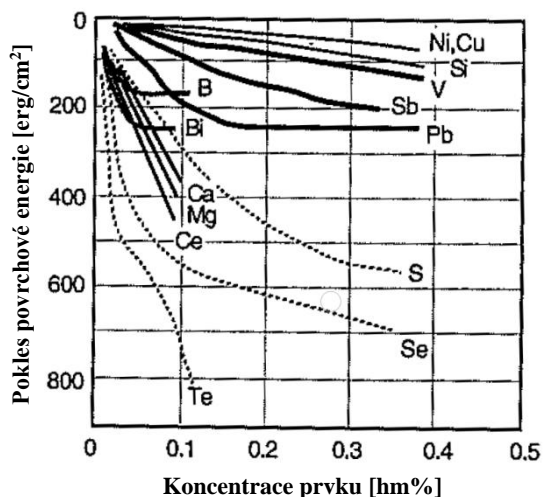


Obr. 10 Vliv teploty na úhel smáčení syntetické litiny Fe-C-Si v argonové atmosféře [16].

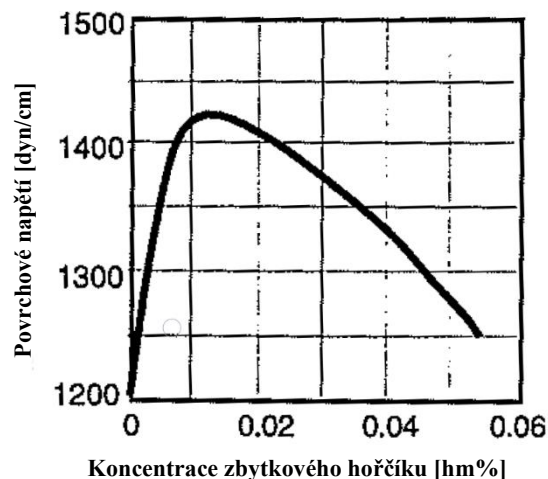
- **Vliv složení odlévaného kovu na úhel smáčení**

Složení litého kovu je faktorem, který má na úhel smáčení nezanedbatelný vliv. V první řadě je nutno specifikovat odlévaný kov. Ocel, litina nebo neželezné kovy mají svá specifika. Jelikož se tato studie zabývá povrchem litinových odlitků, je dále rozebrán vliv chemického složení litin.

Autoři práce *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [18] provedli rozsáhlý experiment s cílem zjistit vliv jednotlivých prvků obsažených v litině na úhel smáčení. Z jejich výsledků vyplývá, že negativní vliv na velikost úhlu smáčení má především síra, která je povrchově aktivním prvkem, a částečně mangan. Při jejich kombinaci se ale vzájemně neutralizují, a to z důvodu vytváření sloučeniny MnS. Při nižších obsazích manganu je tedy jeho vliv neutralizován sírou, která je v takovém případě hlavním prvkem s negativním vlivem na úhel smáčení. Při vyšších obsazích mangan naopak neutralizuje síru a stává se sám hlavním negativním faktorem. Výrazný vliv má pak mangan v koncentracích nad 1,5 %. Významný negativní efekt na úhel smáčení mají také vápník, hořčík a cín. Souhrnný vliv jednotlivých prvků lze vidět na Obr. 11. Hořčík má sám o sobě silně negativní efekt, který se projevuje při obsahu větším než 0,018 %. Graficky znázorněn je na Obr. 12, kde lze vidět vliv koncentrace hořčíku na povrchové napětí, které s úhlem smáčení přímo souvisí [18]. Pod obsahem 0,018 % má naopak pozitivní vliv, a to především z důvodu vázání síry do MgS. Spolu s křemíkem má také pozitivní vliv díky vázání rozpuštěného kyslíku, který se váže do MgO a oxidů křemíku. Kyslík by jinak měl sám o sobě v rozpuštěném stavu velmi negativní vliv, jelikož je, stejně jako síra, v litinách povrchově aktivním prvkem. Proto je dezoxidační efekt křemíku (a případně hořčíku) vítaný.



Obr. 11 Vliv obsahu prvků na povrchové napětí litin při 1400 °C [18].



Obr. 12 Vliv obsahu zbytkového hořčíku na povrchové napětí v litině [18].

• Vliv tvorby lesklého uhlíku na úhel smáčení

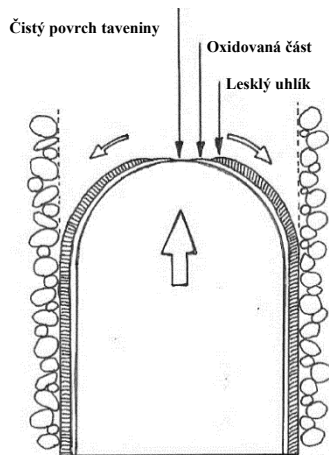
Lesklý uhlík je pyrolytický uhlík (jeho mikrokrystalická forma), vznikající z redukční atmosféry při teplotách 650-1200 °C [19]. Lesklý uhlík lze navíc dělit podle teploty vzniku na nízkoteplotní (vznik při 650-950 °C) a vysokoteplotní (vznik 950-1200 °C), který tvoří velmi tenké filmy. Není grafitem a jeho forma je podobná spíše černému uhlíku. Oproti grafitu má ale mnohem vyšší stálost proti oxidaci, zvláště pak jeho vysokoteplotní forma. [5] Tvoří se pravděpodobně na oxidech SiO_2 a FeO , vznikajících na fázovém rozhraní mezi tekutým kovem a formou. [19]

Výzkumy ukázaly, že se lesklý uhlík vylučuje už při lití, a to na povrchu taveniny licí fronty (Obr. 13). V rámci jejího pohybu pak zůstává uvězněna mezi formou a vlastní taveninou, kde tvoří jistou bariéru a na formovací směsi drží vlivem tření a přítlaku taveniny. Film lesklého uhlíku pak přemostňuje póry a pokrývá zrna ostřiva formy (Obr. 14), čímž dochází k vytvoření hladšího povrchu formy. Lesklý uhlík je také nesmáčen taveninou, díky čemuž může napomoci eliminaci smáčení formy kovem a tím její penetraci. Výhodou lesklého uhlíku je také jeho rozdílná tepelná roztažnost oproti litině. Při chladnutí usnadňuje rozdílná tepelná roztažnost oddělení povrchu odlitku od uhlíkatého filmu, který dále zůstává přichycen na povrchu formy. [19; 5]

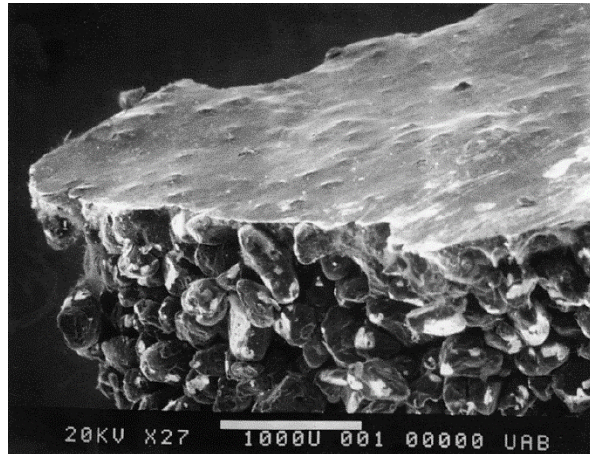
Tvorbu lesklého uhlíku lze podpořit pomocí uhlíkatých příměsí ve formovací směsi, zvláště pak v bentonitových směsích, kde jsou označovány jako nosiče lesklého uhlíku. Lesklý uhlík není jediným produktem vznikajícím z uhlíkatých přísad, ale vzniká zde také koks, nerozložené uhlovodíky a odpadní produkty termodestrukce. V případě litin je podporován také vysokými obsahy uhlíku v tavenině, ze které může difundovat na fázové rozhraní. [5; 6; 20]

Lesklý uhlík tedy významně napomáhá omezení smáčivosti formy tekutým kovem, snižuje pórovitost a přemostňuje nedokonalosti na povrchu formy, čímž přispívá k jejímu lepšímu povrchu. Výhodná je také jeho stálost v oxidační atmosféře, která je zvláště ceněna při lití do syrových forem. Z tohoto pohledu je nedocenitelným pomocníkem při zlepšování povrchu odlitků a prevenci penetrace, zvláště v případě litinových odlitků litých do bentonitových směsí. Jeho nevýhodou je však potřeba relativně klidného plnění, jelikož v případě velkých turbulencí může zůstat film lesklého uhlíku zahlcený v tavenině a později působit jako exogenní vměstek, tzv. uhlíkové pleny (podle [5] vada č. 525). Negativní efekt tvorby lesklého uhlíku může nastávat u ne-bentonitových formovacích směsí. Zde se mohou blány lesklého uhlíku

nalepit na povrch formovací směsi a způsobovat pak nepravidelnosti na povrchu odlitku. [19; 6; 20; 5]



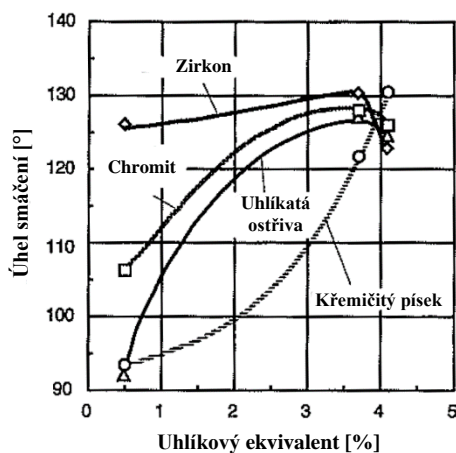
Obr. 13 Schéma tvorby lesklého uhlíku na lící frontě [19].



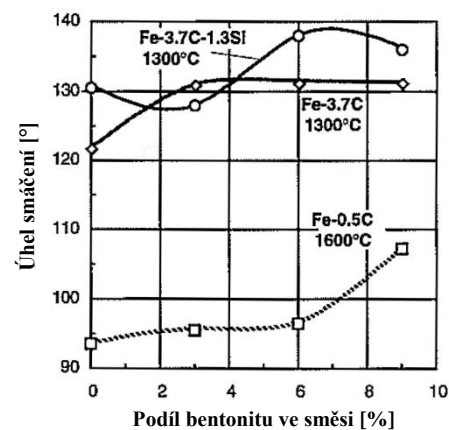
Obr. 14 Film lesklého uhlíku na povrchu formovací směsi [19].

• Vliv formovací směsi na úhel smáčení

Vliv materiálu ostřiva má podle autorů *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [18] velký význam zvláště při nízkých hodnotách uhlíkového ekvivalentu (Obr. 15). S vyšším uhlíkovým ekvivalentem přestává být materiál ostřiva rozhodující, v litinách jej tedy není třeba brát zvláště v potaz. I přesto je nutno podotknout, že při použití litiny s nižším uhlíkovým ekvivalentem bude více smáčeno křemičité ostřivo než zirkon nebo chromit. Pozitivní vliv chromitu a zirkonu by spočíval také ve vyšší tepelné vodivosti těchto písků, což může umožnit rychlejší natunutí povrchové vrstvy kovu. Vzhledem k charakteru odlitků vyrábějících se z litiny by však běžné použití těchto materiálů i nátěrů z nich bylo finančně nevýhodné. Proto se jich využívá jen v nutných případech, např. ve značně tepelně exponovaných částech forem a zvláště jader.



Obr. 15 Vliv uhlíkového ekvivalentu na úhel smáčení různých typů ostřiv taveninou s přehřátím na 150 °C [16].



Obr. 16 Vliv podílu bentonitu ve směsi na úhel smáčení různými druhy slitin Fe-C [16].

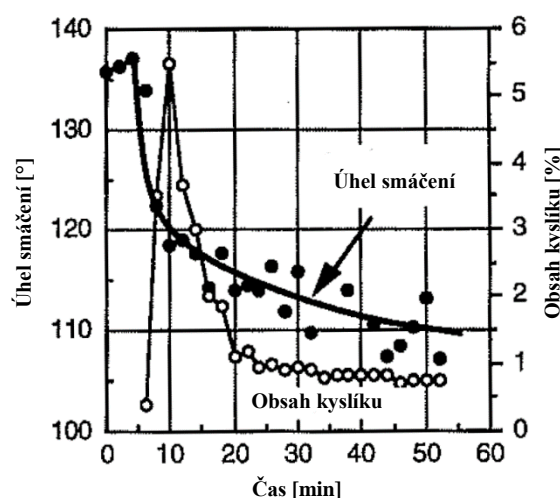
Mírně pozitivní vliv na úhel smáčení má i podíl bentonitu v bentonitových směsích (Obr. 16). Není ale jisté, jestli je jeho pozitivní vliv spojen se změnou energií na fázovém rozhraní, nebo pouze vlivem vyplnění mezizrnových prostor ostřiva jemnými podíly bentonitu. Nejde však

o zásadní vliv a zvyšování podílu bentonitu by určitě nemělo být bráno jako řešení problémů s penetracemi.

- **Vliv atmosféry formy na úhel smáčení**

Atmosféra ve formě má v problematice penetrací rozhodně svůj význam. Zatímco inertní atmosféra může částečně eliminovat ovlivnění tekutého kovu, atmosféra s obsahem kyslíku může na povrchu taveniny vytvářet oxidy. Jejich tvorba má vliv především na chemickou penetraci, která bude rozebrána podrobněji dále. I přesto mohou mít oxidy vliv i na úhel smáčení, který mohou zmenšovat.

Záleží zde zvláště na charakteru atmosféry. Pokud se ve formě bude nacházet redukční atmosféra, nebude jejím vlivem docházet ke snížení úhlu smáčení. Naopak v případě oxidační atmosféry by k tomuto jevu docházet mohlo. Na grafu z experimentu [16] můžeme ale vidět, že i v případě atmosféry s 5 % O₂ by snížení úhlu smáčení o ~ 15° trvalo přibližně 4-10 minut (Obr. 17).



Obr. 17 Úhel smáčení bentonitové směsi slitinou Fe-3,68 % C-1,25 % Si v atmosféře argonu s 5% O₂ [16].

Přidáním uhelné moučky do formovací směsi, popř. použitím grafitového nátěru, lze napomoci vytvoření redukční atmosféry a teoreticky vyloučit vliv atmosféry ve formě jako faktor ovlivňující úhel smáčení. [21]

Metalostatický tlak

Je o základní tlak, podporující penetraci. Vyskytuje se bez výjimky v každém případě a působí od začátku lití, kdy se tavenina dostává do kontaktu s formou, až do vytvoření souvislé kůry na povrchu taveniny, čímž dojde k přerušení styku kapalné taveniny se stěnou formy. Princip jeho vzniku je jednoduchý a je založen na působení tlaku od sloupce tekutého kovu – viz rovnice:

$$P_{met} = \rho * g * h [Pa] \quad (5)$$

kde: ρ – měrná hmotnost kovu [kg/m^3],
 g – gravitační zrychlení [m/s^2],
 h – výška sloupce kovu [m].

Z toho vyplývá, že nejvíce ohrožená budou v tomto případě nejnižší místa odlitku. Zároveň tento tlak bude mít větší vliv v případě vysokých odlitků. Do výšky odlitku je pak potřeba započítat také výšku případných horních nálitků.

Základním řešením vlivu metalostatického tlaku je především úprava polohy odlitku ve formě tak, aby byl větší rozměr umístěn do horizontální roviny.

Dynamický tlak

Dynamický tlak je tlak, který je vyvinut prouděním kovu, který dopadá na stěnu formy a je tímto tlakem vtlačován do jejích mezizrnových prostor. Působí od počátku lití do naplnění formy. Jeho velikost je ovlivněna měrnou hmotností taveniny a rychlostí, kterou kov tryská podle vztahu [16]:

$$P_{dyn} = \frac{\rho * v^2}{2} [Pa] \quad (6)$$

kde: ρ – měrná hmotnost taveniny [kg/m^3],
 v – rychlost proudu kovu dopadajícího na povrch formy [m/s].

Rychlost proudění závisí na licí výšce, ploše zářezu a obecně celkově na návrhu vtokové soustavy a jejích prvků. Její velikost lze přibližně určit pomocí Bernoulliho rovnice, případně pomocí numerických simulací. [22]

Je možno vyvodit, že pro prevenci dynamické penetrace je lepší ustálené a pomalé plnění. Takovéto plnění může eliminovat i případnou erozi jádra/stěny formy, kterou by vysoké rychlosti mohly způsobovat.

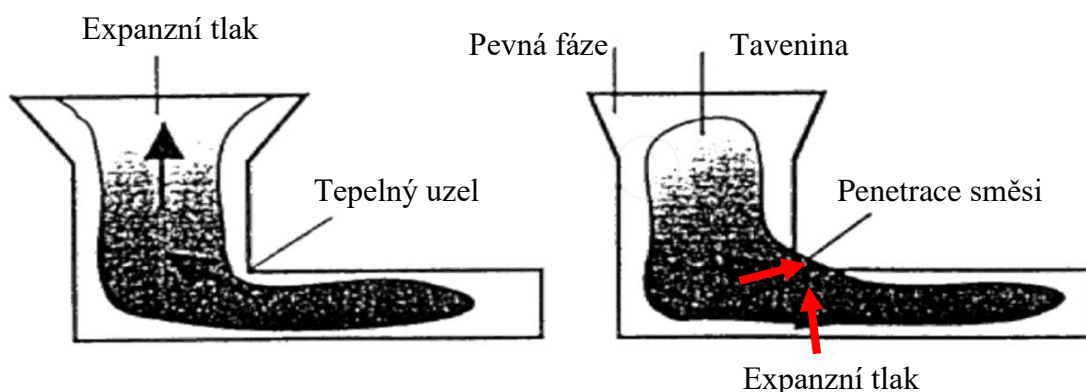
Tlak od expanze grafitického eutektika

Tento typ penetrace je specifický pro litiny, zvláště pak pro litinu s lupínkovým grafitem, spíše výjimečně pak pro litinu s kuličkovým grafitem. Při tuhnutí grafitických litin totiž dochází k tvorbě grafitického eutektika. To se skládá z austenitu a vyloučeného grafitu. Objem eutektika je vyšší než objem taveniny, a to z důvodu vylučujícího se grafitu. Velikost expanze roste se stupněm eutektičnosti. Maximálních hodnot nabývá expanze při eutektickém složení, kdy dochází k největšímu vylučování eutektického grafitu. [5; 16; 6; 23]

Tlak, vznikající při expanzi grafitického eutektika může způsobit vtlačování ještě tekutého kovu do pórů formy. Zásadní vliv zde má především návrh odlitku. V případě, že jako poslední část tuhne vtok, popř. nálitky, je expanzní tlak uvolněn přes tyto prvky. Pokud však dojde k zatuhnutí vtoků a nálitků a tekutý kov zůstane uvnitř odlitku uzavřen, bude na něj expanzní tlak působit. V případě, že pak tekutý kov bude ve styku s formou, bude tento kov vtlačován

expanzním tlakem do mezizrnových prostor formy. Typickým místem výskytu mohou být např. vnitřní rohy odlitků (Obr. 18).

Vyvarovat se penetrací způsobených expanzí grafitického eutektika lze tedy primárně pomocí designu odlitku tak, aby v něm docházelo k usměrněnému tuhnutí (Obr. 18). V zásadě lze říci, že je potřeba zachovat stejné principy, jako v případě staženin u litých ocelí. Další možností, jak předejít tomuto problému z technologického hlediska, je použití měkkých formovacích směsí (bentonit), namísto tvrdých (furan, vodní sklo). Forma se pak může expanznímu tlaku mírně podvolit, takže k penetraci dojít nemusí. [16]



Obr. 18 Schéma mechanismu expanzní penetrace. Vlevo správně navržený odlitek (tlak uniká do nálitku), vpravo špatně navržený odlitek (tlak uniká do formy). [16; 24]

Expanzní tlak lze také snížit pomocí příměsí fosforu do taveného kovu, pokud je tato možnost přípustná. Při 0,2 % by měl úplně eliminovat řešený faktor. [5] Tento efekt by bylo teoreticky možné vysvětlit tak, že vznikající nízkotavitelné fosfidické eutektikum tuhne jako poslední, čímž nechává otevřenou cestu k nálitkům a vtokům, kudy se expanzní tlak může uvolnit. [16; 5]

Tlaková ztráta vlivem tření

Při snaze kovu proniknout do pórů formy dochází ke tření mezi taveninou a povrchem ostřiva a tím ke ztrátám tlaku, který tlačí taveninu do mezizrnových prostor.

Díky výzkumům v oblasti proudění kapalin porézními materiály stanovili autoři [16] ztrátový tlak třením jako [16]:

$$P_f = \frac{\mu}{K} * L_p * v_p \text{ [Pa]} \quad (7)$$

- kde: μ – dynamická viskozita taveniny [Pa*s],
 K – prodyšnost formy [jednotka prodyšnosti – j.p.],
 L_p – hloubka průniku taveniny [m],
 v_p – rychlost vnikání kovu do materiálu formy [m/s].

Prvním faktorem, který určuje velikost třecího odporu je přirozeně viskozita taveniny, kdy tavenina s nižší viskozitou bude vykazovat nižší třecí odpor. Faktorem, který však lze lépe ovlivnit je prodyšnost formy. Ta je závislá jednak na spěchování směsi, jednak na velikosti použitého ostříva. Pokud by bylo použito jemnější ostřívo a dosáhlo se vyššího spěchování směsi, dojde ke snížení prodyšnosti a tím i ke zvětšení třecího odporu vůči penetraci. Možnými technikami zvýšení spěchovatelnosti bentonitových směsí je např. využití střešení, lisování či impulzní formování. Vždy je nutno brát v potaz, že snížením prodyšnosti bude pro plyny ve formě obtížnější ji při lití opustit, a tedy počítat s nebezpečím vzniku bublin v odlitku. [16]

Tlak plynů z formy a jader

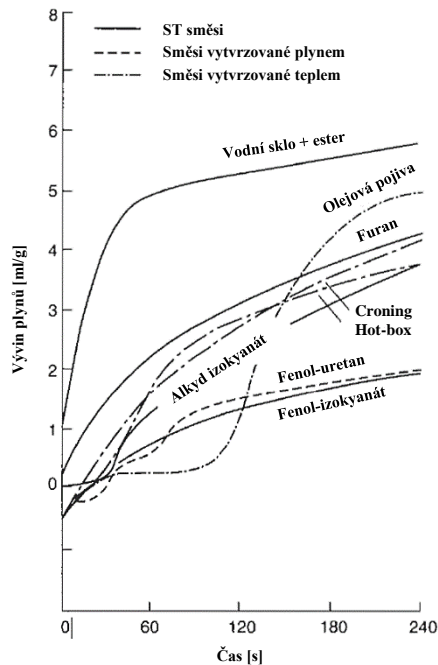
Při kontaktu taveniny s povrchem formovací směsi dochází k vypařování a tepelnému rozkladu složek pojiv, která směs obsahuje. V případě bentonitových směsí jde především o vodní páru. Ta tvoří nezanedbatelnou část vyvinutých plynů i v případě chemicky spojených směsí. Při kontaktu s tekutým kovem dochází k rozkladu velké části páry na kyslík a vodík, které mohou dále ovlivňovat atmosféru formy. V případě chemicky spojených směsí dochází k rozkladu na vodík, kyslík a dusík, všechny v molekulárních podobách, a dále oxid uhličitý, oxid uhelnatý a metan. Poměry obsahu jednotlivých komponent závisí na druhu pojiva a jeho dávkování ve směsi. [16; 20; 21]

Z pohledu komplexní kvality odlitku je třeba sledovat vývin plynů formy jednak vzhledem k problematice penetrací forem, jednak z důvodu dalších vad, které mohou plyny ve formě způsobovat. Zde jde zvláště o exogenní bubliny (vodík), případně vady typu bodlin (dusík). Tyto vady však nejsou předmětem zájmu této práce, v praxi je ovšem nutné s jejich výskytem počítat. [20]

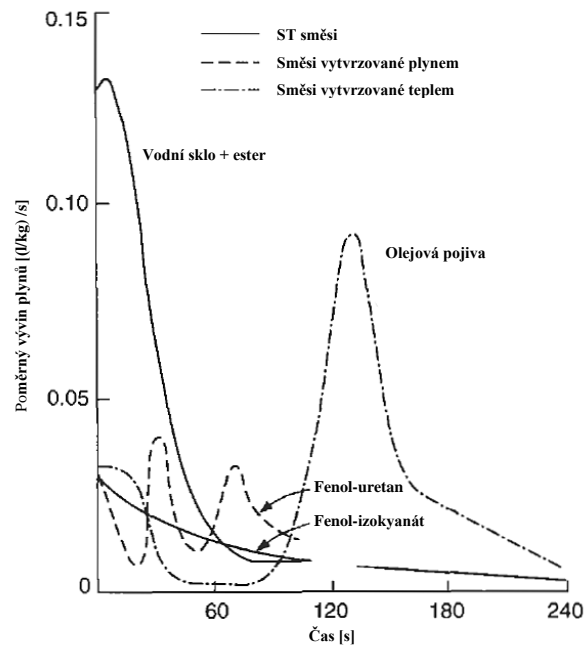
Pokud je směs použita na formu, většinou je možné vliv plynů na penetraci zanedbat téměř úplně. Je to způsobeno především prodyšností formy, která umožňuje odvod vzniklých plynů do okolní atmosféry. Je zde ale potřeba rozlišovat mezi druhy pojiv. V případě bentonitových směsí může totiž docházet k velkému odpaření vody, které může naopak způsobovat explozivní penetraci, která bude podrobněji rozebrána dále. U chemicky spojených směsí odpadá i tento problém, a to jak díky ostřívu, tak pojivu. Ostřívo má vliv především na prodyšnost směsi. Ta je zlepšena díky jeho čistotě a většímu stupni stejnorodosti (rozložení ostříva při síťovém rozboru majoritně na třech sítích), což zvětšuje mezizrnové prostory. I díky zmíněným vlastnostem je možno dávkovat velmi malá množství pojiva, které tak při rozkladu a vypařování generuje podstatně menší množství plynů.

V případě jader je ale vliv směsi na tlak plynů poměrně vyšší. To je způsobeno vlastním účelem jádra, které je ve formě většinou obklopeno z velké části tekutým kovem. Z toho důvodu je pro vznikající plyny obtížnější uniknout z jádra do formy, kam mohou unikat pouze přes známky. Pokud jádra nejsou ošetřena nátěrem, který by snížil prodyšnost jejich povrchu, mohou z nich plyny unikat i přes samotnou taveninu. Vzhledem k většímu kontaktu jádra s kovem dochází také k jeho většímu prohrátí, což způsobuje větší rozklad pojiva a tím vyšší vývin plynů. [20]

Pokud bude sledován vývin plynů v jádru, je důležité v první řadě stanovit, o jaký pojivový systém se jedná. Grafy, ukazující vývin plynů [ml/g] (Obr. 19) a míru vývinu plynů [ml/g*s] (Obr. 20) v závislosti na hmotnosti jádra, jsou uvedeny v práci *Castings: The Mould* [20]. Z grafů vyplývá, že největší vývin plynů se nachází především u směsí s vodním sklem a estery, kdežto naopak nejmenší vývin plynů mají směsi fenol-uretanové, používané v technologii Cold-Box.



Obr. 19 Množství vyvinutých plynů z různých pojivových systémů [20].

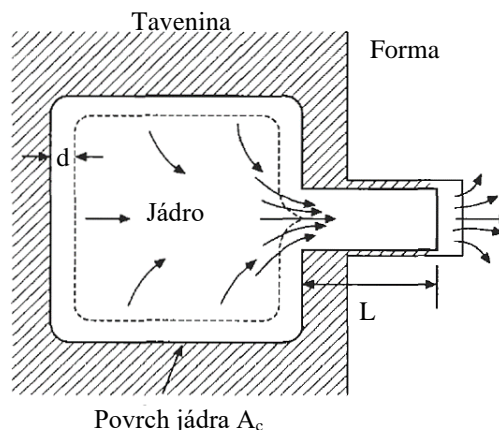


Obr. 20 Míra vývinu plynů z různých pojivových systémů [20].

Pro tlak plynů vznikajících v jádře je v *Castings: The Mould* [20] sestaven vzorec, zohledňující jak typ pojiva, tak prodyšnost formovací směsi a plochu známek (Obr. 21), přes které by mohly plyny z jader unikat. Sestavený vzorec má tvar:

$$P_{gas} = \frac{Q_{gas} * d * A_c * \rho_c * L * T_2}{A_p * T_1 * P_e} [Pa] \quad (8)$$

- kde: P_{gas} – tlak od plynů z formovací směsi [Pa],
 Q_{gas} – míra vývinu plynů dané hmotnosti jádra [ml/g*s],
 d – hloubka prohřátí jádra [m],
 A_c – obsah povrchu jádra [m²],
 ρ_c – hustota jádra [kg/m³],
 L – délka známky [m],
 T_2 – teplota jádra při prohřátí od kovu [K],
 A_p – plocha známky [m²],
 T_1 – teplota, při které byl měřen vývin plynů [K],
 P_e – prodyšnost [j.p.].



Obr. 21 Modelový příklad jádra s odvodušněním přes známku [20].

Hodnoty jednotlivých členů rovnice (8) lze buď odhadnout na základě poznatků odborných prací, simulovat, případně zjistit experimentálně. Teploty lze použít zjednodušeně ve formě poměru T_2/T_1 , který dosahuje hodnot okolo 3 pro lehké slitiny a téměř 6 pro oceli [20]. Největší vliv můžeme pozorovat u prodyšnosti a míry vývinu plynů. Také poměr teplot zde má velký význam při srovnání odlévání různých slitin. Z geometrických parametrů pak může mít velký vliv poměr povrchu jádra ku povrchu známky A_c/A_p . Jádro také musí být dobře usazeno, aby bylo zabráněno výskytu zateklin do známky, které by mohly bránit odvodu plynů z jádra. Ovlivnitelnými faktory jsou tedy především konstrukce známek, prodyšnost jádra a druh použitého pojivového systému. [20]

Pokud přistoupíme k tvorbě plynů v jádře jako k faktoru, pomáhajícímu prevenci penetrací, je v první řadě nutné specifikovat o jaké jádro, pojivový systém a druh taveniny se jedná. Pokud ale obecně srovnáme možné velikosti tlaku vyvinutých plynů, zjistíme, že nejsou tak markantní, zvláště pak v případě fenolových pryskyřic. V práci *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16] autoři uvádí, že v případě směsí pojených chemicky mohou tlaky dosáhnout pouze přibližně 14 kPa. Proto ve své práci tento vliv zanedbávají. I přes nízké hodnoty tlaku mají však plyny v jádrech svůj vliv a mohou prevenci penetrací napomoci. S tlakem těchto plynů je nutno počítat i v rámci výše zmíněných vad typu exogenní (v rámci naplynění kovu teoreticky i endogenní) bubliny, kterým je nutno předcházet prvořadě. [16; 20]

Penetrační index

Z výše definovaných mechanismů mechanické penetrace a jejich vzájemné interakce je možné teoreticky predikovat pravděpodobnost jejího výskytu. K predikci je možno zvolit více faktorů. Často používaným faktorem je výška, pod kterou může za daných podmínek docházet k penetraci. V tomto případě je většinou zanedbáván vliv dynamického tlaku. Rovnice pak tedy predikuje zjednodušeně, a to pouze za využití metalostatického tlaku, úhlu smáčení materiálu a velikosti pórů ve formovací směsi. Takto sestavenou rovnici zmiňují ve své práci autoři *Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings* [6]:

$$h_{pen} = \frac{2 * \sigma_{LV} * \cos \theta}{r_p * \rho_l * g} [m] \quad (9)$$

- kde: h_{pen} – hloubka, pod kterou bude docházet k mechanické penetraci [m],
 σ_{LV} – povrchové napětí na rozhraní tavenina-plyn [N/m],
 θ – úhel smáčení [°],
 r_p – poloměr mezizrnových prostor (kapiláry) [m],
 ρ_l – hustota taveniny (litiny v tekutém stavu) [kg/m³],
 g – gravitační konstanta [m/s²].

Autoři *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16; 18; 21] zavedli komplexnější „penetrační index“, který zahrnuje podstatně více výše zmíněných faktorů. Index je možno zapsat ve tvaru [16]:

$$P_I = \frac{\theta_A}{\theta_{cr}} \quad (10)$$

- kde: P_I – penetrační index,
 θ_A – skutečný úhel smáčení formovací směsi taveninou [°],
 θ_{cr} – kritický úhel smáčení formovací směsi taveninou, po jehož překročení dojde k mechanické penetraci [°].

Jednotlivé faktory jsou zohledněny vzhledem k tomu, jakým způsobem úhel smáčení ovlivňují. Je zde tedy zohledněno ovlivnění úhlu smáčení např. i teplotou a složením kovu. Je stanoveno, že pokud:

- $P_I > 1$, penetrace nehrozí,
- $0 < P_I < 1$, hrozí mechanická penetrace,
- $P_I < 0$, hrozí i chemická penetrace.

Kritický úhel smáčení je možno definovat z rovnováhy tlaků na rozhraní forma-kov (vč. dynamického) a je tvaru [16]:

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left(-\frac{d_p}{4 * \gamma_{LV}} (\rho_l g h + \rho_l v^2) \right) [^\circ] \quad (11)$$

- kde: θ_{cr} – kritický úhel smáčení [°],
 d_p – průměr pórů formovací směsi [m],
 γ_{LV} – povrchová energie na rozhraní tavenina-plyn [J/m],
 ρ_l – hustota taveniny (litiny v tekutém stavu) [kg/m³],
 g – gravitační konstanta [m/s²],
 h – výška sloupce kovu [m],
 v – rychlost kovu, dopadajícího na povrch formy ve zkoumaném místě [m/s].

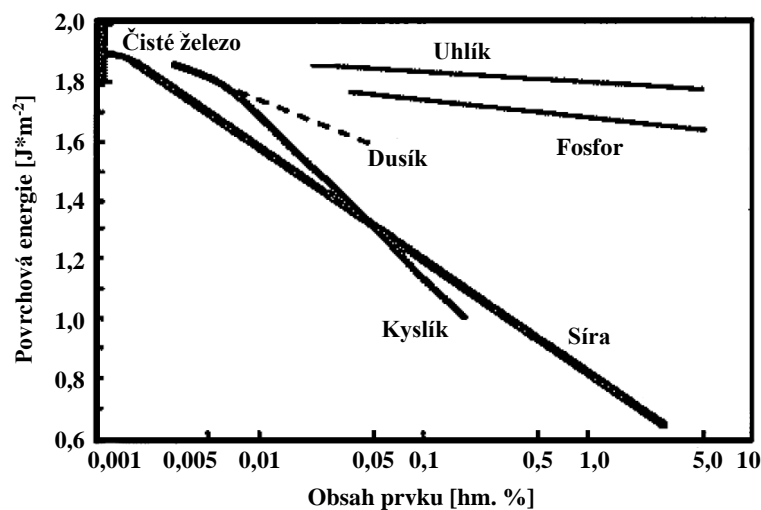
Autoři *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16] ve své práci upozorňují na fakt, že je kritický úhel jak funkcí materiálových proměnných (d_p , γ_{LV} , ρ), tak funkcí proměnných procesních (d_p , h , v). Ty lze v případě řešení problémů s penetracemi ovlivňovat. Kritický úhel smáčení

nezahrnuje tlak od expanzní penetrace, jelikož jsou jeho hodnoty specifické pro daný odlitek. Zanedbává také vliv vývinu plynů z jader a formy. [16]

Definování skutečného úhlu smáčení je poměrně složitější. Je totiž ovlivňován teplotou lití, složením kovu a formovací směsí i složením atmosféry ve formě. Vztahy pro jeho teoretické definování je třeba zakládat na množství vypovídajících experimentů, které autoři [16; 18; 21] provedli. Z nich vychází rovnice, predikující úhel smáčení v závislosti na složení a teplotě kovu. Platnost této rovnice je v rámci složení kovu, které je v rozmezí 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 v rozmezí teplot 1300-1400 °C [18]. Experimenty také potvrdily velmi malý vliv druhu ostřiva. Vliv atmosféry ve formě je pak závislý především na jejím charakteru (jak bylo zmíněno výše) a v rovnici není zmíněn, jelikož je jej třeba hodnotit zvlášť. Výsledný tvar rovnice je tedy následující [18]:

$$\begin{aligned} \theta_A = & 292,837 - 45,159 * [\%C] - 106,134 * [\%Si] - 343,401 \\ & * [\%S] - 18,527 * [\%Mn] - 36,678 * [\%P] + 0,341 \\ & * T + 31,813 * [\%C * \%Si] - 0,118 * [\%C * T] \\ & + 96,114 * [\%Si * \%S] + 0,544 * [\%S * T] \\ & + 129,745 * [\%Mn * \%P] \end{aligned} \quad (12)$$

kde: X% – zastoupení jednotlivých prvků v tavenině [hm. %],
T – lící teplota [°C].



Obr. 22 Graf efektu prvků na povrchové napětí železa při teplotě okolo 1550 ° [25].

Určení výsledného penetračního indexu může být problematické zvláště vzhledem k obtížnému stanovování hodnot γ_{LV} (případně d_p) při hledání kritického úhlu smáčení. Pokud jsou ale tyto hodnoty k dispozici (např. Obr. 22), je penetrační index komplexním nástrojem pro predikci penetrací. Autoři *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16; 18; 21] v práci zmiňují jako součást svého výzkumu i vytvoření programu v excelu, který má za cíl celou evaluaci usnadnit.

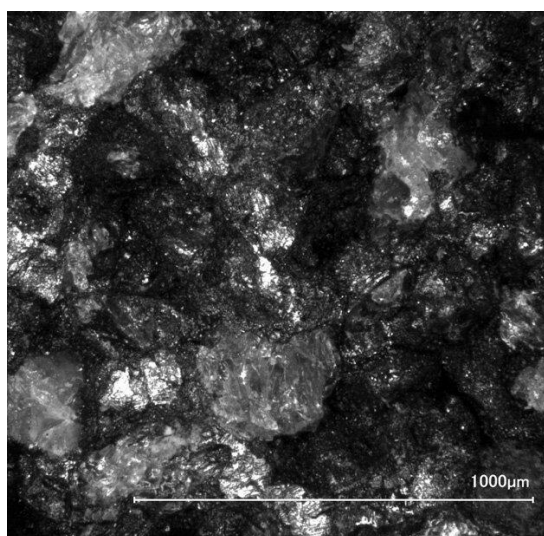
2.2.2 Chemická penetrace

Chemickou penetrací jsou nazývány děje, kdy dochází k penetraci taveniny do formovací směsi za spoluúčasti chemických reakcí mezi kovem, atmosférou formy a ostřivem. Z praktického hlediska mohou chemické reakce buď napomáhat penetraci tekutého kovu, nebo mohou do formovací směsi penetrovat přímo produkty jejich reakcí (Obr. 23). Děje vedoucí

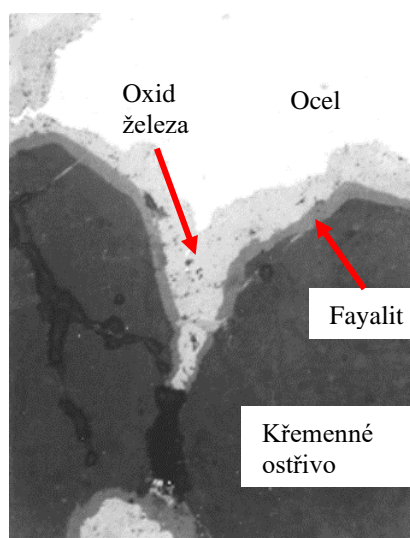
k chemickým reakcím ve formě jsou komplexnější než procesy u mechanické penetrace, a to zvláště z důvodu množství měnících se parametrů, které ji způsobují a ovlivňují. [5; 6]

Princip vzniku chemické penetrace

Základním předpokladem chemické penetrace je vznik oxidů prvků obsažených v tavenině při jejím kontaktu s kyslíkem z atmosféry formy. Atmosféra tedy musí být oxidizujícího charakteru, což je základní podmínka vzniku chemické penetrace u slitin železa. Chemická penetrace nastává také spíše u reaktivnějšího křemenného ostřiva. Může být také podpořena vyšším obsahem živců v méně kvalitních ostřivech.

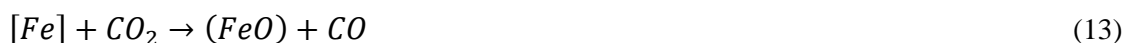


Obr. 23 Zapečená a částečně roztavená zrna křemenného ostřiva v kovu. [27]



Obr. 24 Příklad chemické penetrace ocelového odlitku litého do formy s křemenným ostřivem [26].

Příkladem vznikajících oxidů mohou být např. SiO_2 , MnO a Al_2O_3 . Největší vliv na vznik připečenin má ale vznik oxidu železnatého – FeO . [21] Ten vzniká oxidací na povrchu taveniny podle rovnic [22]:

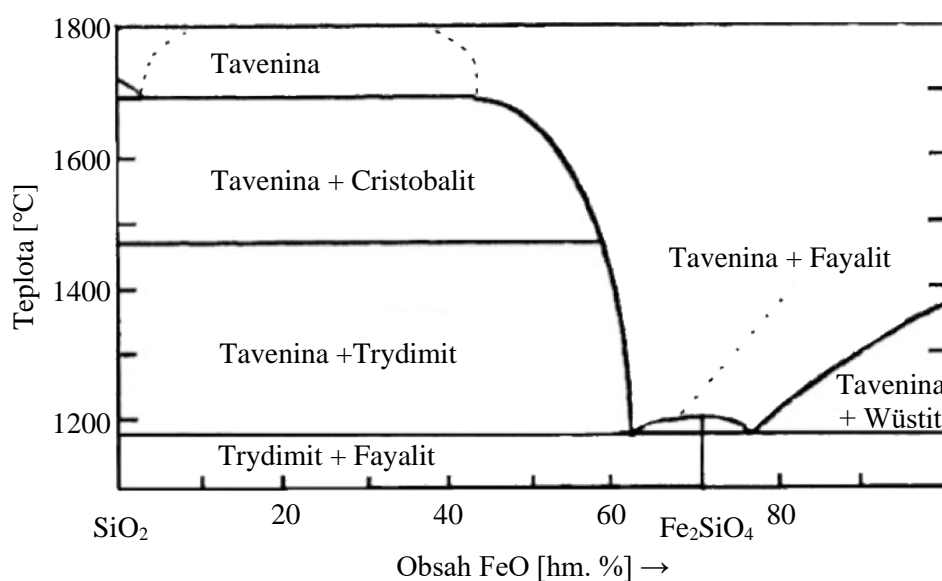


Tyto reakce probíhají za předpokladu oxidační atmosféry a při splnění podmínky, že nejsou přítomny prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, které by oxidovaly přednostně. V případě vytvoření FeO může nastat reakce oxidu s křemenným ostřivem, pokud je použito. To vede k vytvoření křemičitanů binárního typu Fe-SiO_2 , především pak fayalitu Fe_2SiO_4 (Obr. 24), podle vzorce [5; 22]:



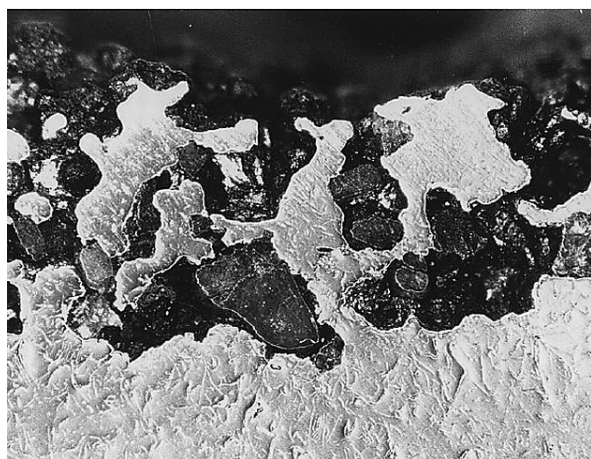
Oxidace taveniny a tvorba fayalitu může způsobovat více problémů. Prvním z nich je smáčivost ostřiva samotným FeO. Ten má úhel smáčení křemenného ostřiva roven 21° , oproti železu, které má úhel smáčení $154,5^\circ$ [6]. Smáčivost ostřiva FeO (případně fayalitem) může tedy způsobit pokles celkového úhlu smáčení výrazně pod hodnotu 90° . To zapříčiňuje změnu směru působení kapilárního tlaku, který přestane působit proti mechanické penetraci. Namísto toho začne do pórů nasávat tekutý kov, čímž mechanickou penetraci naopak podpoří. [22; 16; 5; 6]

Druhou formou penetrace za spoluúčasti chemické reakce mezi oxidy kovu a ostřivem je penetrace samotných produktů těchto reakcí. Příkladem může být přímo výše zmíněný fayalit Fe_2SiO_4 . Na rovnovážném diagramu SiO_2 -FeO (Obr. 25) lze vidět, že má fayalit bod tání přibližně 1205°C [20]. To způsobuje, že zůstává tekutým i po ztuhnutí slitin železa a je tedy s formou v kontaktu v tekuté formě po podstatně delší dobu než vlastní kov. To zvyšuje tendenci pronikání fayalitu do formy a větší oblast připečenin. Tento efekt může být ještě umocněn dalšími reakcemi fayalitu, kdy mohou vznikat křemičitany ternárního typu. Zvláště velký vliv zde má reakce s oxidem MnO za vzniku systémů FeO-SiO₂-MnO, které významně zvyšují hloubku penetrace a přilnavost k ostřivu. Pravděpodobnost vzniku těchto systémů je charakterizována poměrem Mn/Si [22]. [5; 6; 16]

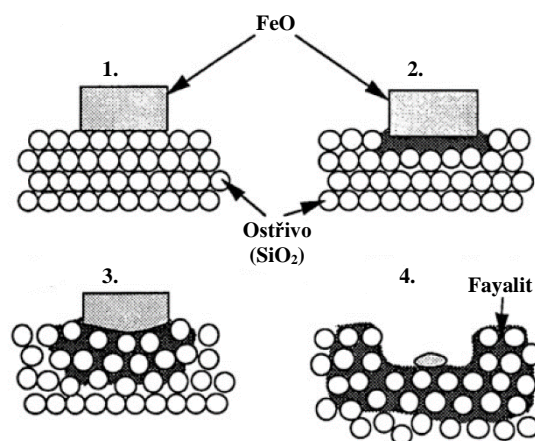


Obr. 25 Rovnovážný diagram SiO_2 -FeO [22].

Je třeba zmínit, že chemická penetrace nemusí mít vždy čistě negativní efekt. Autoři *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16] i *Vady odlitků ze slitin železa* [5] se shodují na tom, že za určitých podmínek je tenká vrstva fayalitu na povrchu odlitku lehce oddělitelná, čímž může napomáhat oddělení odlitku od formy. Zároveň tato vrstva může zlepšovat jakost povrchu odlitku. [5; 16]



Obr. 26 Příklad chemické penetrace. Na obrázku aglomerát kovu, ostřiva a produktů reakcí mezi kovem a ostřivem. [11]



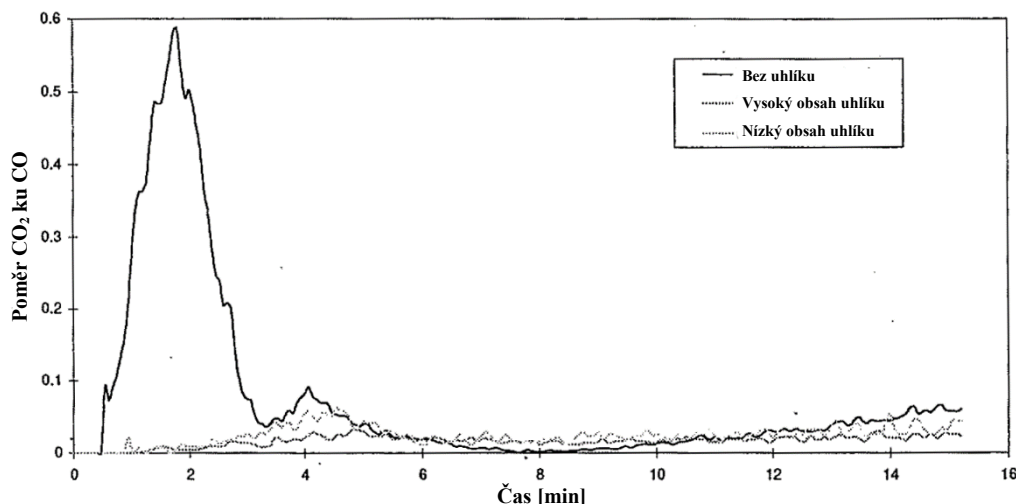
Obr. 27 Penetrace tekutým fayalitem [6].

Charakter atmosféry formy

Jak bylo zmíněno výše, vznik chemické penetrace je primárně podmíněn oxidizující atmosférou formy. Bylo zjištěno, že vady způsobené chemickou penetrací se v případech atmosféry neutrální nebo redukční neobjevují [21]. Oxidaci kovu může způsobit buď kyslík přítomný přímo v atmosféře formy nebo kyslík, pocházející z vodní páry, uvolněné při kontaktu taveniny s povrchem formy. Pro primární posouzení možnosti vzniku chemické penetrace je třeba stanovit charakter atmosféry v dutině formy. [21]

Charakter atmosféry lze vyjádřit poměrem plynů CO_2/CO v atmosféře pece. Výpočty autora [6] ukazují, že při poměru parciálních tlaků $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}} = 10/90$ (0,11) je oxidace železa možná pouze při teplotě 1566 °C, při poměru $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}} = 50/50$ (1) může naopak nastávat už při teplotě 1200 °C. Autoři v práci [21] provedli několik experimentů, zkoumajících atmosféru ve formě při odlévání litin. Experiment byl zaměřen především na zkoumání vlivu materiálu formy na charakter atmosféry. Byly proto zkoumány směsi s různým obsahem příměsí uhlíkatých přísad. Ve všech případech docházelo v první fázi ke snížení obsahu kyslíku a dusíku, naopak ke zvýšení obsahu oxidu uhelnatého a vodíku z důvodu rozkladu vodní páry. Důležitým poznatkem byl fakt, že poměr CO_2/CO nebyl po uplynutí čtyř minut od odlití v žádném případě větší než 0,1. Z toho lze usuzovat, že po této době nemůže dojít k oxidaci železa a tvorbě fayalitu. V případě formy bez uhlíkatých přísad však docházelo v čase okolo dvou minut k nárůstu CO_2 až do poměru téměř 0,6.

Vlivem atmosféry ve formě na tvorbu chemických sloučenin se také detailně zabýval ve své práci *Reoxidační pochody v dutině formy* [28] Jan Rous. Zmíněná práce je zaměřena na reoxidaci oceli, nicméně poznatky o formovacích směsích v ní obsažené mohou být užitečné i v případě odlévání litin.



Obr. 28 Poměr CO₂ ku CO na rozhraní forma-kov ve formách s různými obsahy uhlíkatých přísad [21].

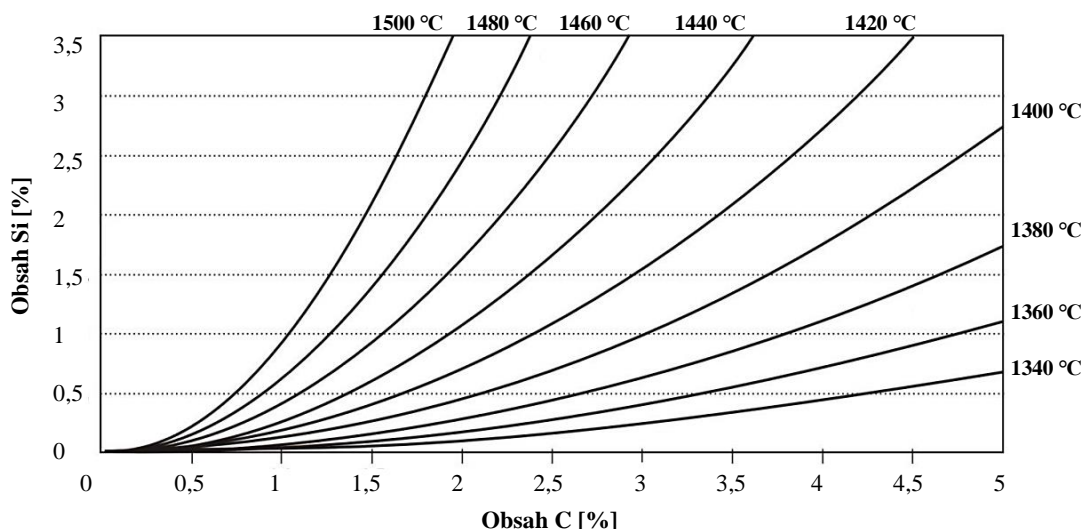
Uhlíkaté přísady ve formovací směsi tedy mají prokazatelně příznivý vliv na prevenci penetrací, a to jak z důvodu eliminace oxidační atmosféry, tak z důvodu zvýšení tlaků formy, které mohou působit proti mechanické penetraci. V případech použití pojivových systémů, kdy není možné přidávat do formovací směsi přímo uhlíkaté přísady (jako kameno-uhelnou moučku), je možné do směsi přidávat spalitelné příměsi (piliny), případně použít uhlíkatý nátěr formy. Nátěry mohou také snižovat smáčivost a prodyšnost formy, což má pozitivní efekt při prevenci mechanických penetrací.

Vliv chemického složení litin

Při splnění podmínky oxidační atmosféry ve formě je pro oxidaci železa ještě nutné splnit podmínky, které jsou ovlivněny zvláště teplotou a prvky přítomnými v tavenině. Železo totiž začne tvořit oxidy pouze tehdy, nemůže-li s kyslíkem reagovat jiný prvek, který k němu má při dané teplotě vyšší afinitu. Litiny ovšem obsahují množství těchto prvků, především velké množství uhlíku a křemíku, které reagují s kyslíkem přednostně. Podle autorů *Cast Iron Penetration in Sand Molds* [16] je parciální tlak kyslíku pro oxidaci uhlíku šestkrát nižší než pro oxidaci železa. V práci také uvádějí, že pořadí oxidace prvků, obsažených v litinách (mimo hořčík) je obecně C, Si → Mn → Fe. Uhlík s křemíkem reagují s kyslíkem podle rovnice [29]:

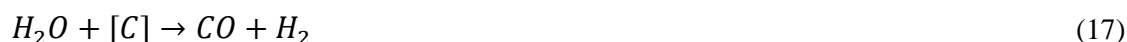


kdy se směr průběhu reakce odvíjí od teploty taveniny vzhledem k rovnovážné teplotě reakce. Hodnota rovnovážné teploty reakce je závislá na obsahu C a Si v tavenině (Obr. 29). Pokud se bude tavenina nacházet nad křivkou rovnovážné teploty pro dané složení, bude obsah kyslíku regulován uhlíkem a bude docházet k jeho oxidaci a tvorbě CO (reakce bude probíhat zleva doprava). Pokud se bude tavenina nacházet naopak pod křivkou rovnovážné teploty, bude řídicím prvkem křemík, který bude při oxidaci tvořit na povrchu taveniny SiO₂ (reakce bude probíhat zprava doleva). [29]



Obr. 29 Průběh rovnovážných teplot pro daný poměr křemíku a uhlíku při parciálním tlaku CO ($p_{CO} = 1 \text{ atm}$) [29].

Při kontaktu taveniny s formou dochází k okamžitému odpaření vody obsažené ve formě. Pára dále reaguje s uhlíkem na povrchu taveniny podle rovnice:



Po zreagování uhlíku na rozhraní vzniká CO, který uniká v plynné podobě. Rozhraní je v tu chvíli oduhlíčeno a v kovu vzniká koncentrační gradient uhlíku, který vede k difuzi uhlíku z objemu taveniny na její povrch. Tam dochází k opětovné oxidaci uhlíku. Uhlík na rozhraní difunduje rychleji, než přechází uvolňující se pára z objemu formy k rozhraní. Proto se tento proces po chvíli ustálí a stabilně pokračuje až do ztuhnutí odlitku. [21]

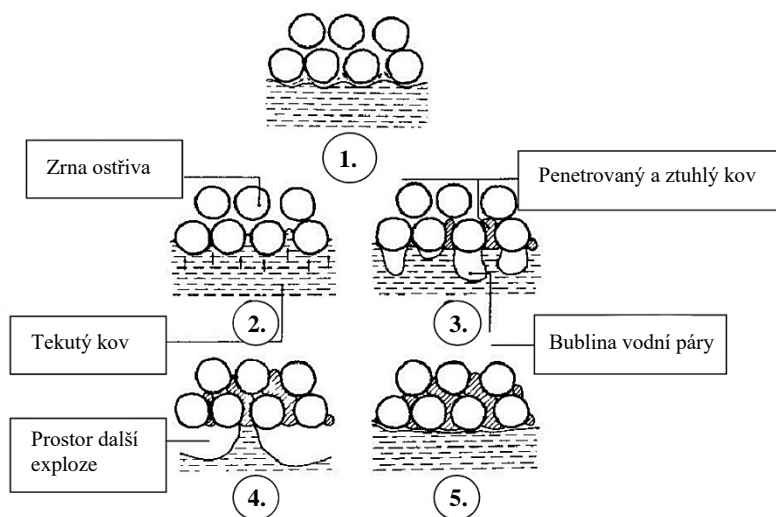
Vzhledem k výše uvedeným faktům lze konstatovat, že v případě odlévání litin nedochází k penetracím chemického rázu. Jejich eliminace je způsobena současně používáním uhlíkatých přísad a nátěrů ve formách (často i z důvodu zlepšení povrchové jakosti) a zvláště pak vlivem vysokých obsahů uhlíku a křemíku v tavenině. Tyto prvky oxidují přednostně a chrání tak taveninu před oxidací, která by vytvořila oxid FeO, potřebný k iniciaci chemické penetrace. [6; 21; 20]

2.2.3 Explosivní penetrace

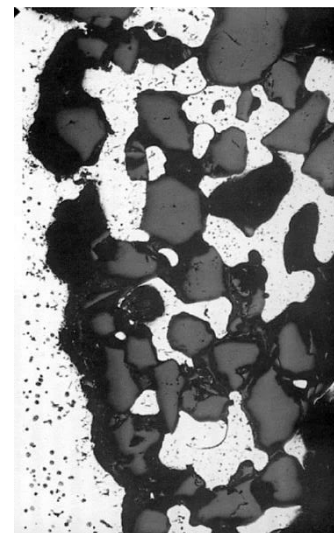
Tento typ penetrace se může objevovat pouze u bentonitových směsí. Není v zásadě součástí výše zmíněného vzorce pro mechanickou penetraci, jelikož vliv tohoto typu penetrace není možné popsat zjednodušeným způsobem, který by byl vhodný pro vzorec. I přesto lze ale mechanismus explozivní penetrace zařadit do kategorie mechanické penetrace, a proto je třeba se i tímto druhem zabývat.

Principem explozivní penetrace je rychlé odpaření vody (popř. společně s vývinem plynů při termodestrukci pojiv) při kontaktu tekutého kovu s formou. Při nedostatečně prodyšné směsi nemohou rychle expandující plyny uniknout do prostor formovací směsi (a odtud se uvolnit mimo formu), musí tedy unikat do prostoru formy, kde se ale už nachází tekutý kov. Bubliny

plynů se do něj vtlačují, přičemž zároveň tekutý kov prochází do pórů. Tím dochází na rozhraní forma-kov k uzavření plynných bublin v tekutém kovu a dojde k jejich další explozi, která vtlačí kov dále do mezizrnových prostor. Prvotní exploze v povrchové vrstvě formy mohou způsobit i rozrušení dříve vytvořené kůry na povrchu odlitku a napomoci tak penetracím i z pohledu delší doby smáčení povrchu. Zároveň mohou exploze vznikat i ve vrchních částech formy ke konci lití, kdy v tomto prostoru dochází k uzavření a hromadění a následným explozím plynů, které nemohly z formy uniknout např. výfuky. [24]



Obr. 30 Mechanismus explozivní penetrace. [24]



Obr. 31 Řez explozivní penetrací. [24]

Exploze mohou způsobit vznik oxidační atmosféry, která může způsobit oxidaci kovu přímo na povrchu formy, případně i v mezizrnových prostorech. V důsledku této oxidace je teoreticky možné, že bude docházet i k navození podmínek pro chemickou penetraci. [6]

Z principu mechanismu vzniku explozivních penetrací lze odvodit, že se vyskytují především u bentonitových směsí, které jsou formovány vyššími tlaky do kompaktnější podoby. Kvůli většímu ztuhnutí formy se snižuje prodyšnost a expandující plyny tudíž mají omezenou možnost úniku z dutiny formy. [24; 5]

2.2.4 Penetrace za pomoci par kovu

Penetrace pomocí par kovu se týká problematiky penetrací i přesto, že nezapadá do žádné z předchozích kapitol. Teorie o její roli je založena na vysokých koncentracích čistého kovu (až 50%), které byly nalézány v zapenetrovaném kovu [5].

Mechanismem tohoto druhu penetrace je přenos určitého množství kovu ve formě par do prostor formy, kde páry kondenzují a mohou způsobovat pokrytí zrn ostřiva tenkou vrstvou kovu. Tato vrstva by vzhledem ke své tloušťce ve většině případů pravděpodobně nemohla způsobovat penetraci jako takovou, nicméně i tenká vrstvička může způsobit markantní snížení úhlu smáčení formy kovem, který poté může penetrovat do mezizrnových prostor. V důsledku pokovení zrn ostřiva také dochází ke změně tepelných vlastností formy. Větší podíl tepla se přenáší radiací, díky čemuž dochází k většímu prohřátí formy. To opět usnadňuje postupování kovu do materiálu formy a způsobuje větší hloubku penetrací. I přesto, že penetrace tekutou fází končí po jejím ztuhnutí, penetrace par kovu může probíhat dále, a to až do teplot okolo 600 °C [5]. [5; 6]

První teorií, popisující tento jev, byla teorie o tvorbě pentakarbonylu železa $\text{Fe}(\text{CO})_5$ z reakce železa s oxidem uhelnatým, nicméně tato teorie byla termodynamickými výpočty vyvrácena. [5; 16]

Druhou teorií je teorie přenosu kovu pomocí tvorby těkavých kovových látek. Teorie popisuje přenos ve formě elementární páry kovu jako takového, případně kovo-oxidickými molekulami, jako jsou $(\text{FeO})_3$, $(\text{FeO})_2$, případně $(\text{MnO})_2$. Tyto těkavé látky dále mohou kondenzovat na zrnech ostřiva. [5; 22]

Predispozicí pro vznik tohoto druhu penetrace je redukční atmosféra ve formě, vzhledem k mechanismu penetrace a vypařování samotného, je také nutná vyšší teplota, a zvláště delší čas pro difuzi par a jejich vypařování. Další významný vliv na sklon k penetraci parami kovu má bez pochyby složení samotné taveniny. Zde hrají významnou roli snadněji se vypařující prvky – síra a především mangan. [5; 6]

Vzhledem k tomu bude k penetracím za pomoci par kovu docházet u těžších odlitků s dlouhou dobou tuhnutí (v řádech hodin) a chladnutí. Docházet k nim teoreticky může také v tepelných uzlech, kde mohou být podmínky pro jejich vznik splněny. Vliv na penetraci v tomto případě nemá druh formovacího materiálu, ale pouze velikost pórů [22].

2.2.5 Penetrace způsobená cristobalitickou expanzí ostřiva

Posledním mechanismem penetrace, který je potřeba zmínit, je působení cristobalitické expanze křemenného ostřiva.

Za mechanismem penetrace stojí v tomto případě expanze křemenných ostřiv, doprovázející jejich přeměnu z $\alpha\text{-SiO}_2$ na cristobalit. Tato přeměna probíhá v rozmezí teplot 900-1000 °C a krystalická mřížka křemene se při ní mění z hexagonální na krychlovou. Cristobalitická expanze je urychlována kationty, jako jsou K^+ a Na^+ , a proto je předpoklad jejího většího výskytu u formovacích směsí na bázi vodního skla.

Expanze je problematická zvláště v případě velkého tepelného namáhání formovací směsi – především tedy v případě jader. Jejím důsledkem je praskání nátěrů a vlastního povrchu formovací směsi, do kterého má následně možnost penetrovat kov. Ten dále prohřívá směs, čímž může docházet k její další expanzi a porušování povrchu. Celý proces může vést k hlubokým zapečeninám s místními hlubšími průniky ve formě výronků. Penetrace nemusí nutně způsobovat další reakce kovu s ostřivem, ale pokud k nim při ní nedojde, je většinou zapečenina poměrně jednoduše oddělitelná od povrchu odlitku. [5; 22]

2.3 Opatření proti penetraci kovu do formovací směsi

Z informací o mechanismech penetrace získaných v předchozí kapitole, lze odvodit opatření pro zamezení jejich vzniku. U většiny zmíněných mechanismů byla opatření k jejich eliminaci alespoň přibližně naznačena. Vzhledem k zaměření této práce bude detailnější pohled věnován dvěma nástrojům pro zamezení penetracím, a to nátěrům pro formy a jádra a možnostem úpravy formovací a jádrové směsi, zejména z hlediska granulometrie ostřiva.

2.3.1 Nátěry pro formy a jádra

Žáruvzdorné nátěry jsou vícesložkové heterogenní systémy (suspenze), tvořené žáruvzdorným plnivem, nosnou kapalinou, pojivy, suspenzními činidly, popř. dalšími přísadami. Jejich funkce

je založena na ovlivňování termických, mechanických i chemických vlastností formy na fázovém rozhraní forma-kov. Díky tomu jsou nejúčinnějším prostředkem pro boj s penetracemi a dalšími vadami povrchu, jako jsou např. výronky. Mohou být používány pro celkové zlepšování kvality povrchu odlitků a usnadňování jejich vyjímání z forem. Z obecného pohledu je tedy smyslem jejich použití šetření nákladů, spojených s kvalitou povrchu odlitků. [30; 31; 32]

Tabulka 2 Příklady dělení nátěrů.

Hledisko rozdělení	Druhy nátěrů
Pro daný typ slitiny	<ul style="list-style-type: none"> - pro litiny (LLG, LKG) - pro oceli (nelegované, legované) - pro neželezné kovy (podle základního kovu) - pro speciální použití (vysokolegované oceli, manganové oceli atp.)
Složení plniva	- na bázi: grafitu, zirkonu, aluminosilikátů, magnezitu, olivínu, křemene
Nosná kapalina	<ul style="list-style-type: none"> - na vodní bázi - na bázi organických rozpouštědel
Charakteristika prostupu do povrchu formovací směsi	<ul style="list-style-type: none"> - krycí - penetračně krycí - penetrační
Metoda nanášení	- optimalizované pro: máčení, stříkání, natírání, polévání
Interakce nátěru s taveninou	<ul style="list-style-type: none"> - neaktivní (inertní vůči tavenině) - aktivní (ovlivňují lokální chemické složení taveniny, např. očkování) - reaktivní (přímo chemicky reagují s taveninou, např. dezoxidace, odsíření)

Z hlediska vlivu na mechanické penetrace využívají nátěry několik mechanismů. Prvním je vyplnění a zmenšení pórů ve formě, čímž se snižuje možnost kovu do těchto pórů pronikat. Dalším neméně významným mechanismem je zmenšení smáčivosti povrchu formy taveninou za pomoci volby nesmáčivého plniva nátěru nebo pomoci tvorby lesklého uhlíku. Bariéra v podobě vrstvy nátěru brání také pronikání kovových par do formy a pokovování zrn ostřiva.

Chemické penetraci mohou nátěry zabraňovat v první řadě vytvořením inertní bariéry na rozhraní mezi taveninou a formou. Toto využití má smysl zejména v případě použití slitin reagujících s ostřivem (např. legované oceli a křemenná ostřiva) či méně kvalitních ostřiv, které by mohly reagovat s taveninou. Nátěry mohou ale pozitivně ovlivňovat i atmosféru na rozhraní forma-kov a podpořit zde tvorbu redukční atmosféry, která působí jako prevence vzniku chemických reakcí.

Použitím nátěru je také dosaženo jemnějšího povrchu stěn formy/jádra, díky čemuž lze docílit obecně lepší kvality povrchu výsledných odlitků a jejich lepšího vyjímání z forem. [22; 32]

Nevýhodou nátěrů může být v některých případech jejich vyšší cena (zvláště v případě zirkonových plniv, používaných zvláště u ocelí). Pokud je však použití nátěru na místě, je cena nátěru vzhledem k úsporám na dokončujících operacích a snížení zmetkovitosti téměř mizivá. Možnou problematickou oblastí může být v některých případech ekologie a případné nároky na ochranné pomůcky na pracovišti, které mohou snižovat komfort pracovníků (např. u nosných kapalin na bázi organických rozpouštědel viz podkapitola *Nosná kapalina*). [22]

Při špatné volbě nátěru, či jeho špatném použití může také dojít k celkovému zhoršení kvality výrobků. Proto by měl být nátěr před nasazením pečlivě vybírán (v závislosti na požadavcích a použití), otestován v provozu a mělo by být dohlédnuto na správný způsob jeho aplikace. [6]

Hlavním obecným požadavkem na nátěry je zajištění kvalitního povrchu odlitku bez vad (přípečeniny a drsný povrch, výronky, plynové vady, oxidické pleny atp.). Konkrétněji lze požadavky na jejich vlastnosti specifikovat takto [31; 32; 22; 33]:

- dostatečné žáruvzdorné a nereaktivní vlastnosti pro odolání tekutému kovu,
- dostatečná přilnavost k formě/jádra,
- dobré krycí a aplikační vlastnosti,
- dostatečná rychlost schnutí bez výskytu vad (např. praskliny),
- dobrá míchatelnost a dlouhá doba sedimentace,
- úroveň prodyšnosti podle potřeby (v rámci možností).

Složení nátěrů

Nátěry se obecně skládají ze žáruvzdorného plniva, nosné kapaliny, pojiva, suspenzních činidel pro kontrolu reologie a dalších přísad. Jejich aplikace je založena na nanášení nátěrové směsi, která je rozptýlena v kapalině do formy suspenze, na povrch formy/jádra. Po nanesení dochází k rozprostření nátěru na povrchu formy/jádra a postupnému vyschnutí nosné kapaliny, která po sobě zanechá přilnutou nátěrovou hmotu. Složení nátěru by mělo umožňovat rovnoměrné rozprostření a jeho dostatečné prostoupení do mezizrnových prostor formy/jádra (podle charakteristiky prostupu – Tabulka 2) pro zajištění dobré přilnavosti a ochrany formy/jádra. Výhodu mají ty nátěry, které při vysychání mění barvu, čímž indikují stupeň vyschnutí. Autor *Foundry Coating Technology: A Review* [32] uvádí, že nátěry mohou sekundárně fungovat i jako určitý systém kontroly jader/forem. V případě horšího spěchování směsi bude totiž v těchto místech nátěr penetrovat do větší hloubky a déle vysychat, což bude indikovat rozdílná barva nátěru oproti dříve vysušenému zbytku. [32; 31]

• Plniva nátěrů

Žáruvzdorné plnivo je základním prvkem nátěru. V koncentrátu nátěru (stav od dodavatele) tvoří 50-70% jeho složení [32], po nanesení a vyschnutí nosné kapaliny až kolem 90-95 % [33]. Je bezesporu hlavním prvkem, definujícím vlastnosti a použití nátěru. Samotné plnivo je charakterizováno jemností a především materiálem, ze kterého se skládá.

Jemnost plniva ovlivňuje nátěr pozitivně z hlediska gelovitosti a roztíratelnosti, odolnosti proti sedimentaci, může také pozitivně ovlivňovat smáčivost nátěru kovem a slinovací schopnosti nátěru. Jemnější plnivo však může také negativně ovlivňovat sklon nátěru k praskání při vysoušení. Volba materiálu plniva je pak závislá především na slitině, se kterou má být využíváno, přičemž se může skládat buď z jednoho druhu žáruvzdorného materiálu nebo ze směsi více druhů. Často používanými materiály na plniva nátěrů jsou křemen, grafit, zirkon

a křemičitan zirkoničitý, aluminosilikáty, elektrokorund, magnezit a olivín, případně mastek. [32; 33; 34]

Požadavky na plniva jsou především [32; 31]:

- dostatečná tepelná odolnost (bod tání, bod sintrování),
- vyhovující tvar (granulometrie), velikost a rozložení částic,
- chemická nereaktivnost vzhledem k odlévané tavenině,
- dostatečná nesmáčivost taveninou,
- definovaná teplotní roztažnost a tepelná vodivost,
- minimální obsah těkavých látek, mineralogická čistota plniva a stálost pH,
- kompatibilita s ostatními složkami nátěru.

Důležitou vlastností plniva by měla být obdobná teplotní roztažnost vzhledem k formovací směsi. Rozdíl by měl být co nejmenší a neměl by přesáhnout 0,1 %. [6]

• **Grafit – C**

Grafit bývá nejčastěji využíván pro aplikace u lití litin, je možné jej také používat pro neželezné kovy. Nepoužívá se při lití ocelí, a to z důvodu okamžité difuze uhlíku do taveniny, která by při kontaktu kovu s nátěrem nastala. To by znamenalo nauhličení oceli a tím změnu jejích vlastností u povrchu odlitku.

Velkou výhodou grafitu je jeho vysoká teplotní odolnost (u čistého grafitu okolo 3 500 °C), velmi vysoká teplotní vodivost (nejlepší z možných plniv) a nesmáčivost taveninou. Tím je dosahováno odolnosti proti penetracím, výrazného zlepšení kvality povrchu odlitků a podstatného usnadnění vyjímání odlitků z forem. Jeho nespornou výhodou je také tvorba redukční atmosféry na rozhraní tavenina-forma, pomáhající předcházet chemickým penetracím. Při vyšších teplotách (650-1000 °C) dochází navíc k pyrolýze a tvorbě lesklého uhlíku, který dále zlepšuje povrch odlitku.

Grafit v nátěru by měl obsahovat maximálně 12-15% popelovin, max. 3% těkavých látek a do 1% vlhkosti. [32; 31; 20]

• **Zirkon a křemičitan zirkoničitý – ZrO₂, ZrSiO₄**

Zirkon a zirkonsilikáty jsou vysoce žáruvzdorným materiálem s možností využití u odlévání ocelí. Jejich použití není vhodné především u manganových ocelí, a to z důvodu vzájemné reaktivity ze strany pH.

Plniva na bázi zirkonu disponují vysokou žáruvzdorností. Teplota tavení ZrSiO₄ je přibližně 2 200 °C a ZrO₂ přibližně 2 727 °C. Vyznačují se vysokou chemickou čistotou a nízkou reaktivností a výhodná je i nízká smáčivost těchto plniv roztavenou ocelí. Zirkon se mimo to vyznačuje i velmi nízkou teplotní roztažností, což je výhodné při aplikacích u technologie přesného lití, kde se využívá i jeho dobrá tepelná vodivost. Ta je přibližně dvojnásobná oproti křemenu a může napomoci tvorbě jemnozrnnější struktury na povrchu odlitku.

Nevýhodou zirkonových plniv pro použití s litinami je především jejich cena. Ta je předurčuje k použití spíše na teplotně vysoce exponovaných místech forem/jader (na formách/jádrech masivních odlitků) nebo v případě odlitků s vyšší přidanou hodnotou. U ocelí jsou zirkonová plniva používána běžně. [32; 22; 31]

- **Magnezit – $MgCO_3$ (MgO)**

Metalurgický magnezit (magnezit žíhaný na 1500-1600 °C) je využíván především v případě masivních ocelových odlitků a pro použití s legovanými oceli, zvláště s vysokým obsahem manganu. Při těchto aplikacích předčí i zirkonová plniva. Odolnost proti chemickým reakcím se zásaditými oxidy získává díky svému zásaditému pH. [35]

Základní složkou je MgO s teplotou tavení 2826 °C. Výhodou je kromě vysoké teplotní odolnosti je i vysoká tepelná vodivost a nízká tepelná roztažnost, což z něj dělá materiál odolný proti teplotním šokům. [35]

Vzhledem k jeho zásaditému charakteru jej nelze použít v kombinaci s kyselými pojivovými systémy, se kterými by za vyšších teplot reagoval. [35]

- **Korund/ elektrokorund – Al_2O_3**

Plniva Al_2O_3 jsou často využívána, a to především kvůli dobrému poměru žáruvzdornosti a odolnosti ku jejich ceně. Použití nalézájí u ocelových, litinových i neželezných slitin. Nejsou příliš vhodná k použití pro masivní ocelové odlitky.

Z hlediska žáruvzdornosti je korund s teplotou tavení 2050 °C o něco horší než zirkon. Je vysoce netečný k oxidům železa [35].

Výhodou je v případě korundu také možnost jeho syntetické výroby (elektrokorundu) přetavením oxidu hliníku v elektrických pecích. Díky tomu je jeho používání částečně nezávislé na přírodních zdrojích. [22; 34; 30; 35]

- **Aluminosilikáty – $Al_2O_3 \cdot SiO_2$**

Aluminosilikátová plniva jsou stejně jako korundová poměrně univerzální. Jsou často využívána v provozech odlévajících litiny. Mezi přírodní aluminosilikáty patří např. sillimanit a andalusit, které mají stejný vzorec, ale jinou krystalickou strukturu. Při teplotách 1500-1700 °C pak přecházejí v mullit. [30]

Teplota tavení aluminosilikátů variuje okolo 1700-1830 °C v závislosti na poměru složek. Jejich hlavní nevýhodou oproti zirkonu je větší reaktivita, smáčivost taveninou a větší míra tepelných dilatací. Dilatace pak mohou při vystavení tepelnému zatížení způsobovat praskání nátěrů. Výhodou oproti zirkonu a korundu je zvláště jejich nižší cena.

Vlastnosti aluminosilikátových plniv lze zlepšovat přísadami oxidů. Oxid chromitý například zvyšuje žáruvzdornost a snižuje smáčivost. Oxid hořečnatý zase vytváří s oxidem hlinitým spinel s objemovou změnou, která způsobuje větší dilataci plniva. Ta může kompenzovat případnou dilataci křemenného ostríva a zabraňovat praskání nátěru. [22; 34]

- **Olivín – $(MgFe)_2 \cdot [SiO_4]$**

Olivínová plniva se používají především do nátěrů pro litiny, případně i pro oceli, nebo problematičtější neželezné kovy. Jsou odolná proti reakcím s bazickými slitinami a díky tomu je lze používat i pro manganové oceli.

Olivín má teplotu tavení vyšší než křemen – přibližně 1760 °C. Jeho výhodou oproti křemenu je také absence rizika silikózy, což je zánětlivé plicní onemocnění, způsobené ukládáním jemného křemenného prachu v plicích. [32; 35]

- **Křemen – SiO₂**

Křemenná moučka může být použitelným plnidlem tam, kde nevádí reaktivnost křemene. Je výhodná prakticky pouze kvůli své nízké ceně. Velkou nevýhodou je cristobalitická expanze křemene a jeho reaktivnost s oxidy železa při vysokých teplotách. Téměř se nevyužívá, případně jen pro neželezné slitiny. [32; 7]

- **Nosná kapalina**

Nosná kapalina je kapalinou, ve které jsou rozmíchány jednotlivé složky nátěru. Samotná nosná kapalina tvoří okolo 20-40% dodávaného koncentrátu nátěru [32] a slouží k transportu nátěru na povrch formy/jádra a k jeho dobrému rozprostření po něm. Je zásadní, aby nosná kapalina po aplikaci dobře vyschla a zanechala vrstvu nátěru bez jejích zbytků, které by mohly působit defekty odlitku typu exogenních bublin. Autor *Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings* [6] poukazuje na zjištění, že jádra s nátěry na vodní bázi a pojivem na bázi epoxid-akrylátové pryskyřice generovala o 50% více plynů než stejná jádra bez nátěru. To však mohlo být teoreticky způsobeno i nedostatečným vysušením.

Druh nosné kapaliny se často používá k základnímu rozdělení, a to na nátěry s nosnou kapalinou na vodní bázi a na nátěry s nosnou kapalinou na bázi organických rozpouštědel. Často jsou směsmi různých kapalin, aby bylo dosaženo optimálního rozmíchání pevných složek nátěru a požadované hloubky jeho prostoupení do formy/jádra. [32; 34; 33]

- **Nosné kapaliny na vodní bázi**

Základem těchto nosných kapalin je voda. Výhodou nátěrů s vodní bází je především nízká cena a dobrá dostupnost vody. Voda je také netoxická a nehořlavá. Obecně je tedy nejbezpečnějším a nejekologičtějším nosičem a v současnosti lze pozorovat výrazný trend směrem k maximálnímu nasazení nátěrů na vodní bázi. [33]

Vodní nátěry ale mají i velkou řadu nevýhod. Hlavním je bezesporu pomalé odpařování vody. Je proto nutné při použití těchto nátěrů zavádět sušičky forem/jader, nebo jim nechat prostor pro dostatečné vyschnutí. Zvláště problematické může být vysoušení hlubších dutin. Pozůstatky nedostatečně vysušené vody mohou při odlévání podporovat vznik oxidační atmosféry. Voda, přítomná v nátěru, může také negativně ovlivňovat pevnost některých formovacích směsí, zvláště pak v případě směsí s vodním sklem. Nátěry také mohou při teplotách pod bodem mrazu zamrznat. Při dlouhodobějším skladování po otevření mohou degradovat vlivem tvorby bakterií ve vodě, čemuž se ale dá bránit pomocí přísad. [32; 31; 34; 33]

V současnosti se používání vodních nátěrů rozšiřuje, zvláště v provozech s velkou výrobou menších jader. Je zde totiž možno urychlit výrobu pomocí využití robotů s konstantním průběhem máčení a případně i velkých (průběžných) sušiček jader. Vodní nátěry se prosazují zejména kvůli úsporným opatřením a pozitivním ekologickým a hygienickým vlastnostem.

- **Nosné kapaliny na bázi organických rozpouštědel**

Mezi tento typ nosiče patří především isopropanol (IPA), omezeně metanol/etanol. Často dochází k tvorbám směsí výše uvedených složek k dosažení ideálních vlastností nosné kapaliny (např. směs IPA a etanol v poměru 50:50). Doporučovaná čistota isopropanolu je až 99%, 1 % tvoří voda. Při nesprávném ředění může docházet ke zhoršení vlastností při vysoušení. Nátěry s těmito nosnými kapalinami jsou v praxi často označovány zjednodušeně jako nátěry alkoholové. [33]

Výhodami organických nosných kapalin je především rychlá doba schnutí dobrá kompatibilita s většinou pojiv a smáčivost forem těmito kapalinami při aplikaci vlivem nižšího povrchového napětí. Rychlé době schnutí může napomáhat i jejich hořlavost – v případě potřeby je možné je po aplikaci zapálit, čímž dochází k rychlejšímu odstranění nosiče z nátěru. Zapalování je však možné použít pouze pro směsi s vodním sklem, u jiných směsí může dojít k jejich tepelné degradaci.

Nevýhodou organických nosičů je především jejich vyšší cena vůči vodním (pokud je u vodních nosičů pomínuta nutnost sušiček). Velmi problematickou je také hořlavost, nátěry s těmito nosiči musí být při nepoužívání zavřeny a je potřeba zabezpečit jejich okolí z hlediska požární bezpečnosti. Problematické jsou i z pohledu hygienického, kdy je třeba obstarat pracovníkům potřebné ochranné pomůcky, které mohou snižovat jejich komfort při práci (zvláště respirátory). V současnosti lze také pozorovat tlak na jejich nahrazování vodními i z ekologických důvodů. [32; 34; 33; 31]

• Pojiva

Hlavní funkcí pojiva je propojení částic plniva a jejich přichycení k povrchu formy/jádra. V nátěru se jeho obsah pohybuje okolo 1-5% [32]. Jeho přesné množství se odvíjí především od hrubosti plniva. Jemnější plnivo vyžaduje pokrytí většího povrchu částic. Příliš malé množství může způsobovat nedostatečné propojení částic plniva a nedostatečnou přilnavost nátěru. Příliš velké množství může zase způsobovat křehkost a praskání po vysušení.

Nevýhodou některých, především organických pojiv, může být sklon k tvorbě plynů v důsledku pyrolýzy při kontaktu s taveninou. Z toho důvodu mohou některé nátěry způsobovat vady typu exogenní bubliny. V některých případech ale mohou tyto produkty působit i pozitivním vlivem, např. pokud při nich vzniká uhlík na povrchu nátěru, nebo pokud pozitivně ovlivňují atmosféru formy [36].

Pojiva pro vodní nátěry jsou většinou na organické bázi. Patří sem sulfitový louh, jíly jako kaolin a bentonit, dextrin, melasa, cukry a škroby, případně i furanové a fenolové pryskyřice. Z anorganických lze zmínit vodní sklo. Nevýhodou některých těchto pojiv může být biodegradace vlivem bakterií při dlouhém skladování [32].

Pojiva pro nátěry na bázi organických rozpouštědel jsou složena z přírodních nebo syntetických pryskyřic. Lze sem zařadit furan, fenol, fenol-formaldehyd, novolak a přírodní pryskyřici (kalafunu). [32; 34; 31; 36]

• Suspenzní činidla

Suspenzní činidla (systém kontroly reologie) slouží především k zajištění dobrých vlastností suspenze tvořené ostatními složkami nátěru. Tvoří 1-5 % jeho složení. [32] Jako suspenzní činidla se používají jíly, polymery a gumy [33].

Hlavní význam suspenzních činidel je v prevenci sedimentace, shlukování částic a k udržování nátěru v optimálním stavu suspenze. Sedimentace je způsobena rozdílnou hustotou jednotlivých složek. Pro správnou funkci nátěru je nutné, aby vydržel ve stavu promíchané suspenze po co nejdéle dobu bez míchání. Činidla mají také vliv na náročnost rozmíchání nátěru po delším skladování.

Druhou funkcí činidel je zajištění vhodného chování nátěru při aplikaci. Činidla jsou volena vzhledem k druhu aplikace, ke které je nátěr určen. Pro aplikaci natíráním či máčením jsou často navrhována jako Birminghamské kapaliny. To znamená, že se při vnesení energie do nátěru snižuje jeho viskozita, a naopak se zvyšuje při jeho uklidnění. Podobné chování můžeme pozorovat např. u běžných malířských barev. Snižováním viskozity při natírání či ponoření při máčení je zajištěno dostatečné a rovnoměrné nanesení nátěru. Naopak zvýšením

viskozity při dotření nebo vytažení z lázně je zajištěno ulpění nátěru na povrchu a zabránění jeho přílišnému stékání. [32; 33; 31]

U vodních nátěrů se můžeme často setkat s používáním natrifikovaného bentonitu. Ten při kontaktu s vodou nabobtná a vytváří gel. Jeho nevýhodou je špatná kontrolovatelnost jeho kvality a stahování při schnutí, které může způsobit praskání nátěru. Proto je nahrazován polysacharidy (ty vyžadují speciální mixéry pro míchání nátěru) a formami karboxymetylové celulózy.

Nátěry na bázi organických rozpouštědel využívají modifikovaný (organický) bentonit (anglicky nazýván bentone). Vzniká nahrazením anorganických kationtů Ca a Na organickými. [32]

• **Přísady**

Mezi další přísady nátěrů mohou patřit smáčedla k zajištění dobrého smáčení formy nátěrem, přísady ke zmírnění pěnění, látky k ovlivnění rozptylování částic či k omezení vzniku bakterií ve vodních nátěrech. [34; 33]

Přísady mohou mít také vlastnosti, ovlivňující přímo taveninu na mezifázovém rozhraní tavenina-forma. Podle těchto vlastností můžeme nátěry dělit na neaktivní, aktivní a reaktivní.

Neaktivní nátěry jsou inertní vůči kovu, nijak s ním nereagují a tvoří pouze bariéru proti penetraci.

Aktivní nátěry mohou místně ovlivňovat složení taveniny. Mohou být například použity k očkování povrchové vrstvy odlitku.

Reaktivní nátěry chemicky reagují s taveninou a mohou mít dezoxidační či odsiřovací funkci. Např. v případě použití MgO (případně směsi s CaO) mohou tyto nátěry sloužit k odstranění síry vnesené do taveniny formovací směsí (furany, PU systémy). Při použití hořčíku s FeSi neslouží nátěr pouze k odsíření, ale zároveň i přímo podporuje tvorbu kuličkového grafitu ve svrchní vrstvě odlitku. [6]

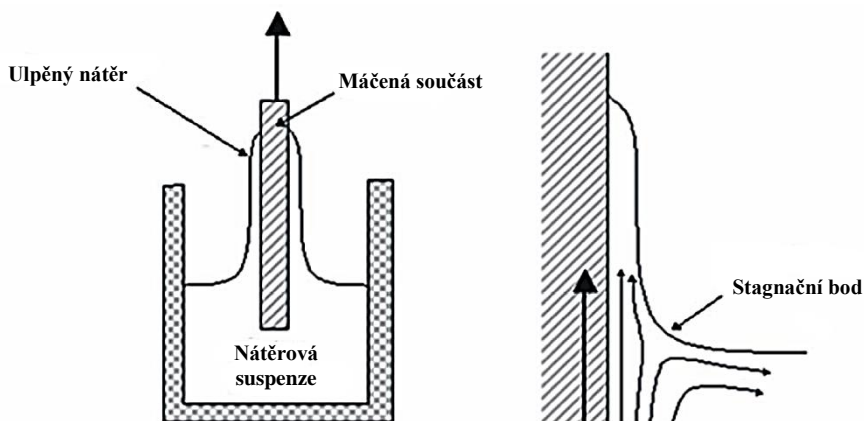
Metody nanášení nátěrů

Mezi základní metody nanášení nátěrů patří máčení, polévání, natírání a stříkání. Druh nanášení nátěru může významně ovlivňovat jeho funkčnost, kvalitu povrchu výsledného odlitku a efektivitu využívání nátěrové hmoty.

• **Máčení**

Máčení zahrnuje ponoření jádra do nátěru a následně jeho vytažení a okapání. Je nejrychlejší metodou aplikace a používá se zvláště pro vysoce produktivní výrobní linky. Při správné volbě nátěru zůstává na jádru po okapání ideálně tlustá vrstva. V případě nevhodné volby nátěru mohou hrozit vady ve formě kapek nátěru, vznikajících při špatné metodice máčení a větší absorpce nosné kapaliny do objemu formy/jádra, zapříčiňující delší dobu sušení.

Je nezbytné zabezpečit konzistentní vlastnosti nátěrové lázně, ideálně stálým mícháním. Stejně tak je potřeba zajistit konzistentní metodiku máčení, aby nedocházelo k proměnné tloušťce nanášené vrstvy nátěru. Nátěr by měl mít pseudoplastické reologické vlastnosti – snížení viskozity při aplikaci (střížného) napětí při máčení a její obnovení po uklidnění (Obr. 32). Tím dochází k zajištění rovnoměrného nanášení nátěru vyhovující tloušťky bez zbytečného skapávání. Vzhledem k pseudoplastickým vlastnostem se dosahuje při rychlém vyjímání nátěru vytvoření tlustší vrstvy než při pomalém. [31; 32; 34]

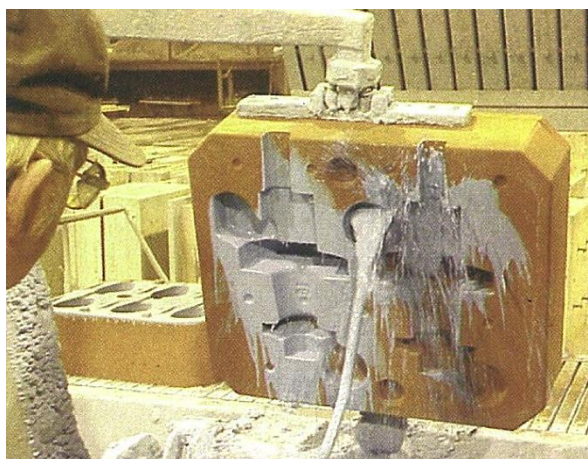


Obr. 32 Mechanismus ulpívání nátěru při máčení [32].

• Polévání

Tato metoda je vhodná k aplikaci nátěrů na velká jádra či formy. Nátěr je aplikován pomocí membránových čerpadel, která jej nízkým tlakem pohání rozvodným systémem a skrze trysku je jím polévána forma/jádro. Odtud opět stéká do sběrné nádoby, odkud je znovu nasáván čerpadly. Výhodou je možnost pokrytí velkých a složitých forem/jader a nenáročnost aplikace. Nevýhodou je náročná údržba systému, jelikož jsou čerpadla i rozvodný systém abrazně opotřebovávány částicemi plniva. Možnost použití metody je limitována především velikostí sběrné vany nátěru. Pro dobrou funkci nátěru může být také potřeba aplikovat více vrstev – spodní penetrační (pro prostoupení do směsi a vytvoření podkladu pro svrchní vrstvu) a svrchní krycí (tvořící ochrannou vrstvu formy/jádra ulpěnou na penetračním podkladu) [32].

Konzistencí by měl nátěr umožňovat nanesení rovnoměrné vrstvy bez rizika vzniku kapek. [31; 32]



Obr. 33 Příklad aplikační techniky poléváním [37].

• Natírání

Natírání je nejjednodušší metodou aplikace. Natíráním je zajištěno vetření částic nátěru do povrchu formy/jádra. Je možno natírat i objemnější objekty. Výhodou může být jednoduchá aplikace více vrstev nátěru a absence složitějšího vybavení pro aplikaci. Nevýhodou je především dlouhá aplikační doba. Dalšími nevýhodami jsou jednoznačně stopy po natírání na povrchu formy/jádra, nutnost zručnosti natírače a nerovnoměrnost vrstev nátěru. Také

je problematické natírání úzkých a hlubokých otvorů. Vlivem špatné aplikace může navíc docházet k uvolnění ostříva z formovací směsi.

Nátěr by měl mít thixotropní reologické vlastnosti – po aplikaci stříhového napětí dojde ke snížení viskozity, jako v případě máčení, ale pomaleji, obnovení původní viskozity probíhá rychle a ne okamžitě, nýbrž až po chvíli. Tím by mělo být zajištěno rozprostření stop po štětcí. [31; 32; 34]

- **Stříkání**

Výhodou stříkání je možnost pokrytí větší plochy a nanesení i velmi tenké vrstvy nátěru (pokud je to vhodné). Nátěr kopíruje povrch formy, případně může tvořit „krupicovitou“ strukturu. Nevýhodou je především nízká penetrace nátěru do formy, velká ztráta nátěrové hmoty při aplikaci a zhoršené pracovní prostředí. Při nástřiku složitějších tvarů navíc dochází k vzájemnému překrývání vrstev. To ve výsledku zapříčiňuje nekonzistentní tloušťku výsledné vrstvy nátěru. Pro správnou aplikaci je potřeba zajistit zkušeného operátora a kvalitní zařízení.

Nátěry pro aplikaci stříkáním jsou charakteristické nižší viskozitou pro zajištění dobrého nanesení ve formě blížící se aerosolu. Touto metodou lze za použití elektrostatiky aplikovat i nátěrové hmoty bez nosných kapalin. [31; 32; 34]

Testování a příprava nátěrů

Při přípravě nátěru je třeba dbát zejména na jeho dobré promísení a na kontrolu základních vlastností, které jej charakterizují. Jsou tedy potřeba určité provozní testy, které mají za cíl zajistit, aby byla kvalita nátěru konzistentní. Při výběru nátěru je pak potřeba dalších testů, díky kterým lze zjistit vhodnost nátěru pro danou aplikaci, jelikož i nátěry s podobným složením se mohou na daném odliktu při specifické aplikaci chovat různě. Tyto testy lze nazvat testy laboratorními.

- **Provozní testy**

Do běžně používaných provozních testů patří především zkouška měrné hmotnosti, viskozity a tloušťky nátěru. První dvě slouží především ke kontrole správného ředění nátěru a konzistence jeho rozmíchání. Kontrola tloušťky nátěru slouží ke kontrole aplikace.

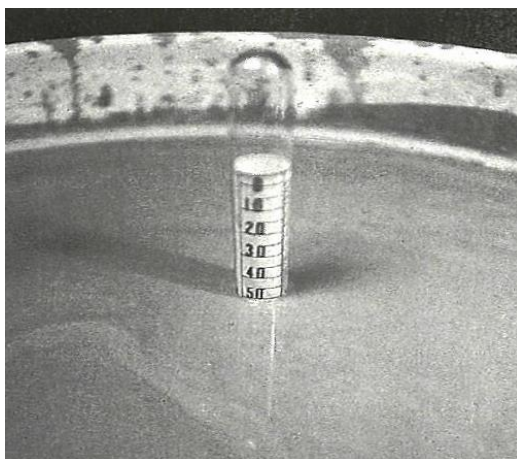
- **Měrná hmotnost [Bé]**

Měrná hmotnost je jednotkou hmotnosti na jednotku objemu. Z velikosti její hodnoty lze uvažovat přibližný poměr plniva ku nosné kapalině v nátěru, resp. naředění nátěru. Zvláště u nátěrů dodávaných v koncentrátu je důležité je ředit a udržovat na předem zkouškami stanovené hodnotě hustoty.

Pro měření měrné hmotnosti se nejčastěji používá parametr Baumé, prováděný Baumého hydrometrem. Skládá se ze skleněné trubičky, která je ve spodní části zatížena závažím z olova, či rtuti. Uvnitř trubičky je kalibrovaná stupnice.

Měření probíhá tak, že je trubička pomalu ponořena do kapaliny. Vzhledem k měnícím se vlastnostem nátěrů při zatížení je nutné dbát na velmi pomalé ponoření. Trubička se pomalu ponořuje do hloubky až do ustálení. Poté lze hustoměr vyjmout a ze stupnice odečíst naměřenou hodnotu Baumé.

Baumé slouží nejen k měření měrné hmotnosti, ale v praxi bývá jeho hodnota často vztažena i k viskozitě. [32]



Obr. 34 Příklad měření Baumé hustoměrem [37].

- **Viskozita [doba odtoku podle pohárku]**

Dalším parametrem, který je často v praxi měřen, je viskozita nátěru. Viskozita specifikuje schopnost tečení nátěru. Používá se, podobně jako měrná hustota, k určení poměru pevných částic ku nosné kapalině. Čím větší je množství nosné kapaliny v nátěru, tím nižší má viskozitu.

V provozu se viskozita měří pomocí kalibrovaného Fordova pohárku, což je nádobka o specifikovaném objemu (100 ml) s kalibrovaným otvorem ve dně o normovaných průměrech. Pohárky jsou normovány podle ISO 2431, DIN 53 211 a ASTM D 1200. Ve slévárenství se používají podle potřeby průměry odpovídající průměru 4 a 6 mm DIN 53 211.

Měření probíhá tak, že je celý pohárek ponořen pod hladinu kapaliny a vzápětí rychle vytažen s kapalinou uvnitř. Kapalina začne vytékat otvorem ve dně a měří se čas, po který z pohárku vytéká (Obr. 35). Z naměřených hodnot času lze pomocí výpočtů, nomogramů či pomocí softwaru určit dynamickou i kinematickou viskozitu v odpovídajících jednotkách. V praxi je ale měření Fordovým pohárkem často využíváno spíše jako bezrozměrná porovnávací zkouška, kdy se porovnávají naměřené časy s časem, který je opět stanovený zkouškami pro optimální hustotu nátěru.

Kalibrované a normované pohárky jsou přesné a jejich použití je možné v laboratorních podmínkách. Výhodou této metody měření však je, že pro porovnávací provozní zkoušky je možné použít i nekalibrovaný pohárek, stačí pouze všechna měření provádět stejným pohárkem, aby byla srovnatelná.



Obr. 35 Měření viskozity pomocí Fordova pohárku [32].

- **Tloušťka nátěru [μm]**

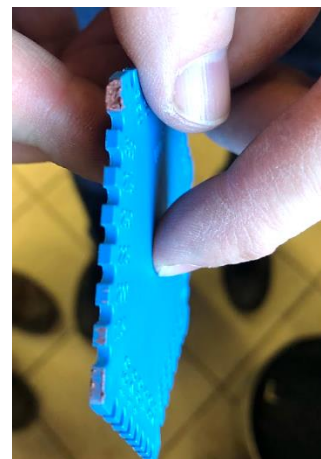
Tloušťka nátěru je zkouškou, kterou se kontroluje především konzistence aplikace. Lze s ní ale i porovnávat schopnosti krytí různých nátěrů.

Zkouška využívá destruktivního testování nátěru pomocí standardizované kalibrované stěrky se zoubky. Dva krajní jsou nejvyšší a mezi nimi se nachází další zkrácené a odstupňované po určitých délkách. Odstupňování se vybírá v závislosti na dané aplikaci. Měřena je vrstva nátěru buď po zavadnutí do matného vzhledu, případně i po vyschnutí. Při měření se umístí stěrka na povrch natřeného vzorku a kousek plochy se s ní setře. Poté je sledováno, na kterých zoubcích ulpěl nátěr. Hodnota naměřené tloušťky nátěru odpovídá hodnotě, nacházející se mezi hodnotami prvního zubu bez ulpěného nátěru a prvního zubu s ulpěným nátěrem.

Stěrka je často využívána pouze jako kontrola nanesené vrstvy. I přesto existují vztahy, které definují provázanost této zkoušky s viskozitou nátěru – zejména při máčení. Pomocí této zkoušky lze tedy nepřímým sledovat i tento parametr. [32]



Obr. 36 „Hřeben“ na měření tloušťky vrstvy nátěru, stupnice v μm [38].



Obr. 37 Měření tloušťky nátěru.

- **Laboratorní testy**

Laboratorní testy se provádějí především při změnách nátěrů či hledání optimalizace jejich využívání. Patří sem zejména zkouška prodyšnosti a zkouška penetrace nátěru. Lze sledovat také vliv nátěru na pevnost jádrové směsi, odolnost proti sedimentaci, smáčivost formovací směsi nátěrem a chování nátěru při sušení a žihání. V rámci laboratorních zkoušek se provádí i zkoušky zmíněné výše jako provozní. Posledním testem nátěrů jsou pak testy v praxi, kdy se sleduje chování nátěru přímo na reálných nebo zkušebních odlitcích.

- **Zkouška prodyšnosti [jednotka prodyšnosti – j.p.]**

Prodyšnost nátěru charakterizuje, jaké množství plynu je schopno přes vrstvu nátěru proniknout. Tento parametr je důležitý vzhledem k tomu, že ve formě dochází při lití k vývinu plynů, které je potřeba z formy odvést. I v případě, že je forma vybavena správně fungujícími výfuky je třeba prodyšnost nátěru sledovat. Důvodem je především vývin plynů ze samotného nátěru při vlastním kontaktu s kovem. Plyny, vznikající zvláště při rozkladu pojiva, zůstávají totiž uvězněny mezi tekutým kovem a vrstvou nátěru. Pokud je vývin plynů větší než prodyšnost nátěru, může docházet ke vzniku exogenních bublin. Nižší prodyšnost je naopak žádána tam, kde je třeba udržet plyny uvnitř

jader/formy – např. při odvodu plynů středy jader či v případě formovacích směsí s velkými výviny plynu.

Prodyšnost nátěru je ovlivněna především jemností plniva. Je ale ovlivněna i tvarem jeho částic a charakterem zbytku komponent nátěru. Finální a určující je pak zvláště tloušťka nátěru. [34]

Naměřené hodnoty v laboratoři se mohou lišit od reálných hodnot, a to zvláště z důvodu rozkladu pojiv a některých dalších složek nátěru, které po sobě mohou zanechat póry zvyšující prodyšnost. [32]

Prodyšnost je měřena na standardizovaném přístroji pro měření prodyšnosti. Zkušební těleso je válec (průměr 50 mm, výška 50 mm). Prodyšnost se stanoví ze vztahu [37]:

$$K = \frac{V * h_{zk}}{S * \Delta p * \tau} [m^2 * Pa^{-1} * s^{-1}, j. p. (jednotka prodyšnosti)] \quad (18)$$

kde: V – objem vzduchu prošlého zkušebním tělesem [m³],
 h_{zk} – výška zkušební tělesa [m],
 Δp – přetlak protlačovaného vzduchu [Pa],
 S – průřez zkušební tělesa [m²],
 τ – čas, za který projde přes váleček objem vzduchu [s].

Prodyšnost nátěru lze pak stanovit tak, že je změřen nejprve váleček bez nátěru a poté s nátěrem. Prodyšnost nátěru lze pak stanovit ze vztahu [30]:

$$K_n = \frac{\delta_n}{\frac{h + \delta_n}{K_1} - \frac{h}{K_2}} [j. p.] \quad (19)$$

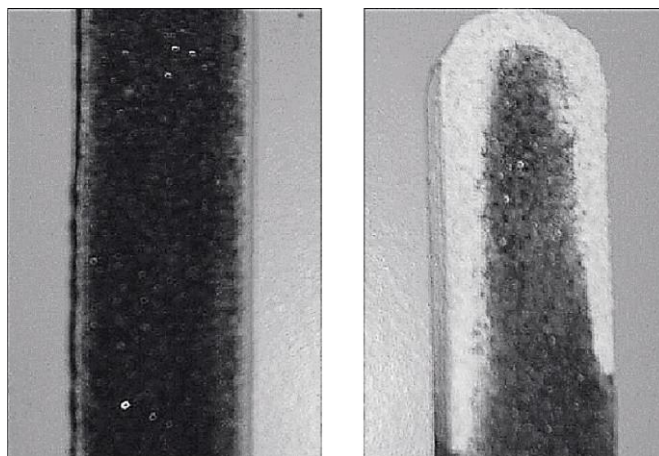
kde: δ_n – tloušťka vrstvy nátěru [mm],
 h – výška zkušební tělesa [mm],
 K₀ – prodyšnost nenatřeného vzorku [j.p.],
 K₁ – prodyšnost natřeného vzorku [j.p.].

• Zkouška prostupu nátěru do formovací směsi

Jako prostupnost nátěru (nebo schopnost penetrace do formovací směsi) je nazývána jeho schopnost prostupovat do hloubky mezi zrna ostřiva a zvyšovat tak přilnavost nátěru k formovací směsi. Zároveň se s hloubkou prostoupení zvyšuje ochranná funkce nátěru a snižuje jeho prodyšnost. Nátěry se dají podle této vlastnosti obecně dělit na krycí a penetrační/impregnační (Tabulka 2). Krycí nátěry slouží k vytvoření ochranné vrstvy na povrchu formovací směsi. Penetrační nátěry slouží k hlubšímu propojení se stěnou formy/jádra a působí jako prevence hlubokých připečenin.

Pokud nátěr do jádra málo prostoupí, může být hůře zakotven a později může docházet k jeho odlupování a praskání. Pokud je naopak jeho prostoupení příliš hluboké, snižuje se prodyšnost jádra. Hloubku prostoupení nátěru přímo ovlivňuje směs jádra/formy. Směs méně spěchovaná a s hrubším ostřivem bude umožňovat podstatně hlubší prostoupení, než směs jemná a hutná.

Kontrolu penetrace nátěru je možno provádět destruktivně na vzorku jádra, jehož materiál by měl odpovídat reálně používané směsi. Testovací jádro je nejdříve pokryto nátěrem způsobem, odpovídajícím aplikaci v provozu. Poté je odpovídajícím způsobem vysušeno a je jím proveden příčný řez. Ten je možno dále zkoumat pod mikroskopem či stereolupou a definovat hloubku prostupu daného nátěru. Autor *Foundry Coating Technology: A Review* [32] uvádí, že běžně je optimální hloubka prostoupení nátěru do formovací směsi okolo dvou až čtyř zrn ostřiva. Optimální hloubka prostupu je ale pro každý nátěr jiná v závislosti na jeho specifikacích. [34; 32; 37]



Obr. 38 Příklad rozdílu v hloubce prostoupení mezi běžným a penetračním/impregnačním nátěrem [39].

2.3.2 Úpravy formovací a jádrové směsi

Jak bylo zmíněno v kapitole o mechanismech penetrace, kvalita povrchu a riziko penetrací kovů do formovacích směsí jsou jednoznačně spojeny s druhem formovací směsi, potažmo s ostřivem. Jedním ze způsobů prevence připečenin může tedy být i ovlivnění ostřiva a pojiva (formovací směsi).

Úpravy ostřiva

Úprava ostřiva je jednou z možností ovlivnění kvality povrchu odlitku. Vzhledem k tomu, že je riziko mechanické penetrace přímo spjato s velikostí pórů ve formovací směsi a riziko chemické penetrace spojeno s druhem ostřiva (jeho mineralogií), nabízí se možnost ovlivnit tyto faktory.

Pokud je potřeba řešit problém mechanické penetrace, je jednou z možností použití jemnějšího ostřiva. Jde o relativně nenáročný zásah do technologie, který může mít významný vliv na kvalitu struktury povrchu odlitku. Je však třeba počítat s tím, že s jemnějším ostřivem a zmenšením pórů ve směsi bude docházet i ke snížení prodyšnosti, které by mohlo vést ke vzniku bublin z důvodu špatného odvodu plynů z formy. Zároveň je pravděpodobné, že vlivem většího povrchu zrn a vyšších obsahů prášných podílů v jemnějším ostřivu dojde ke zvýšení spotřeby pojiva.

Pokud je třeba řešit problém chemické penetrace, nabízí se více řešení v závislosti na původu vady. V případě používání křemenného ostřiva je v první řadě možno vyměnit ostřivo za kvalitnější s menším obsahem živců. V případě, že tento krok není řešením, je možné nahradit křemenné ostřivo jiným, a to buď v celém objemu jádra/formy, či pouze na jejich

lících (tepelně exponovaných) částech. Nekřemenná ostřiva jsou ale podstatně dražší než křemenná a je často praktičtější v tomto případě využít výše zmíněných nátěrů. Chemické penetrace mohou také vzniknout v důsledku pojivového systému, jelikož některé systémy podporují oxidační atmosféru ve formě. V tomto případě jsou opět dvě možnosti – vyměnit systém, nebo používat nátěry. Třetí možností pro oba případy je využití přísad do formovací směsi, které mohou podpořit vznik redukční atmosféry a tím napomoci prevenci chemických reakcí. Příkladem mohou být typické uhlíkaté přísady v bentonitových směsích.

Z výše uvedeného vyplývá, že ovlivnění formovací směsi může pomoci pozitivně ovlivnit zejména mechanickou penetraci, a to spíše při řešení méně závažných vad typu drsný povrch. Pokud je třeba řešit připečeniny způsobené chemickou penetrací, je často nejlepším řešením využití nátěrů.

2.4 Charakteristika formovacího systému JBS s jádry Cold-box

Formovací systém, využívající jednotnou bentonitovou směs (JBS) na formy a technologii Cold-box (CB) pro výrobu jader, je běžně využíván ve slévárnách litin, ocelí i neželezných kovů. Výhodou obou technologií (a jejich kombinace) je především dobrá kvalita povrchů a potenciál vysoké produktivity, díky čemuž nachází využití ve vysoce produktivních slévárnách se sériovou výrobou (např. automatické linky DISA). Jsou však vhodné pro výrobu prakticky všech velikostí odlitků (do 500 kg), s využitím jak ručních, tak poloautomatických až automatických formovacích linek.

Výhodou kombinace obou technologií, je mimo produktivitu i jejich dobrá chemická kompatibilita. Cold-boxová jádra je tak možno použít k oživení JBS. Nutno je přitom sledovat ztrátu žíháním, přes kterou se kontroluje obsah tepelně nedegradované pryskyřice ve směsi.

2.4.1 Pojivový systém jednotné bentonitové směsi (JBS)

Bentonitové formovací směsi jsou jedny z nejstarších formovacích směsí. V oblasti lití litin pravděpodobně stále patří mezi nejvíce využívané. Setkat se s nimi však lze i v provozech zpracovávajících neželezné kovy a oceli. Díky svým vlastnostem nacházejí využití především ve výrobě malých a středních odlitků. Omezením z hlediska pevnosti směsi je maximální hmotnost odlitku 500 kg.

Bentonit

Bentonitem je nazýváno jílové pojivo, tvořené minimálně ze 75% montmorillonitickým jílem, zbytek tvoří doprovodné jílovité minerály (illit, kaolinit aj.), horniny a organické materiály. Montmorillonit je sám o sobě sopečným jílem se složením $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Výhodou bentonitu jsou především jeho vlastnosti jako vysoká vaznost, plasticita, dobré adsorpční vlastnosti aj. Oproti jiným jílům potřebuje k dosažení požadované vaznosti až třikrát méně vody, což při jeho použití umožňuje odlévání do syrových forem. [30]

Pro zlepšení jeho vlastností v kondenzační zóně (zvláště pevnosti) je v praxi využíván takřka pouze natrifikovaný bentonit, ve kterém jsou kationty Ca nahrazeny kationty Na. Zpevňování bentonitových směsí je na bázi Van der Waalových (75-80 %) a kapilárních (20-25 %) sil. [30]

Jednotná bentonitová směs (JBS)

JBS je formovací směsí, skládající se z několika vzájemně se ovlivňujících částí. Pojivový systém je tvořen bentonitem. Ostřívo je v naprosté většině na bázi křemenu. Mimo tyto dvě základní části je pro bentonitovou směs potřeba řada příměsí. Mezi nejdůležitější patří kamenouhelná moučka (KUM), plnicí úlohu nosiče grafitu a lesklého uhlíku, uhlohydráty a případně oxidanty zlepšující vlastnosti bentonitu. [35]

Výhodou JBS je především snadná regenerace směsi. Linky využívající tuto směs většinou operují s okruhem, majícím celkový obsah směsi od jednotek po stovky tun. Regenerace směsi pak spočívá v odstraňování přebytečné směsi, obnovování jejích jednotlivých složek a reaktivaci směsi pomocí přidání vody v mísiči, zajišťujícím její promíslení. Je také nezbytné přidávat nový bentonit k nahrazení „mrtvého“ bentonitu, který je zničen teplem v povrchové vrstvě formy při kontaktu s taveninou. Zároveň je třeba přidávat bentonit na obalení nového písku, přidávaného do směsi buď ve formě rozsypaných jader (v provozu s jádru), či ve formě nového písku, přidávaného k nahrazení písku, zničeného teplem a abrazí (v provozech bez jader). Konečně je třeba nahradit spálené uhlíkaté přísady pomocí nové KUM. [31]

Stav JBS je nutno stále monitorovat a predikovat množství přísad, potřebných na její obnovení. Jejich množství se odvíjí zvláště od poměru množství kovu na množství formovací směsi v jedné formě. Pomocí něj se vyjadřuje poměr tepelně ovlivněné směsi, kterou je třeba obnovit, ku směsi neovlivněné.

2.4.2 Technologie Cold-box

Technologie Cold-box byla vyvinuta v 70. letech 20. století. Jedná se o vysoce produktivní technologii, kdy je směs s pojivem vsřelena do jaderníku a následně je její vytvrzení urychleno za pomoci katalyzačního plynu. Systémů pojivo-tvrdidlo je více druhů, převažuje však polyuretanový (PU) Cold-box. [40]

V případě PU Cold-boxu je využíváno smíchání dvou složek – pojiva a tvrdidla, které spolu tvoří směs. Pojiva jsou typicky na bázi fenolové/fenol-formaldehydové pryskyřice (složka I) a tvrdidla na bázi polymerního isokyanátu (složka II). Poměr obou složek je převážně volen 1:1. Jako katalyzátoru je využíváno plynného aminu. Používán je trietylamin (TEA), dimetyletylamin (DMEA) nebo dimetylisopropylamin (DMIA). [40; 41; 31]

Technologie Cold-box umožňuje téměř okamžité vytvrzení na manipulační i finální tvrdost při použití za pokojových teplot. Zajišťuje také dobrou rozměrovou stabilitu, a to i v případě skladování. Výhodou je také malá spotřeba pojiva, vysoká pevnost směsi po vytvrzení a výborná rozpadavost směsi po odlití. Využití nachází především v případě bentonitových formovacích směsí a lití do kokil. Obecně ale jde o technologii s velmi univerzálním využitím. [42; 40; 31]

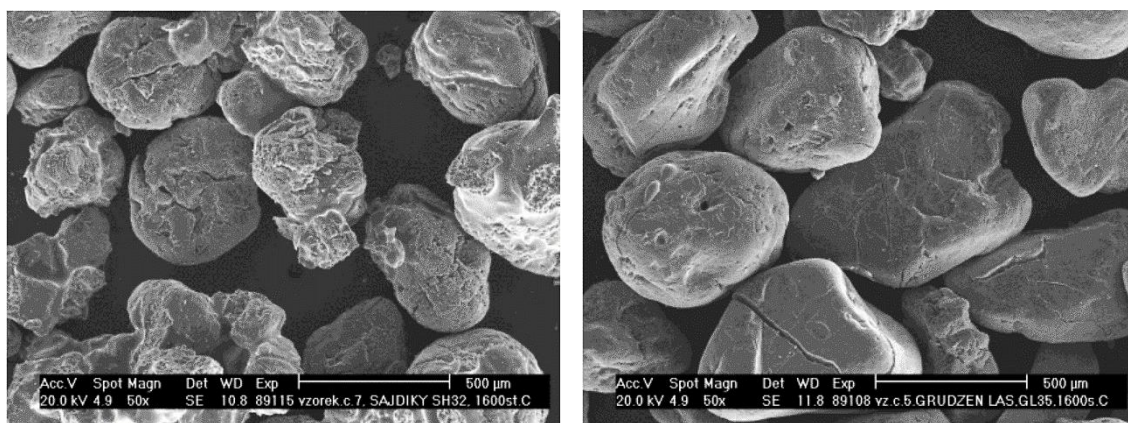
2.4.3 Ostřívo v systému Bentonit – Cold-box

Ostřiva používaná v systémech Bentonit – Cold-box jsou v případě litin z valné většiny křemičitá – zvláště pak v případech drobnějších odlitků. Vliv na tuto volbu má zvláště cena, která je u křemičitých ostřiv značně nižší než v případě nekřemenných alternativ. Jejich použití také umožňuje nižší lící teplota litin než např. v případě ocelí. U vysokých teplot totiž mohou snadněji nastávat chemické reakce ostřiva se zásaditějšími taveninami, jelikož je křemen ostřivem kyselým. Nevýhodou křemene je také nestejněměrná tepelná dilatace při přeměnách: α -křemen \rightarrow β -křemen (573 °C) \rightarrow β -tridymit (870 °C). Zvláště problematickou je pak

crystalitická expanze. Ta nastává okolo 900-1000 °C, podporují ji kationty (Na, K) a je nevratnou. V důsledku expanze křemenného ostřiva tak může docházet k praskání jader a nátěrů, což může vést k tvorbě vad typu výronky a usnadňovat penetrace. [35; 43]

Mineralogická čistota

Při vyšších teplotách také může docházet ke spékání vlastního křemenného ostřiva (Obr. 39 vlevo), a to v případech, kdy není zajištěna jeho dostatečná mineralogická čistota. Mezi mineralogicky poměrně čisté písky (obsah živců 1-8 %) lze zařadit písky vznikající v období druhohor-křídý, kdy vznikaly usazováním na mořském dně. Riziko spékání u těchto písků nastává obecně až při teplotách nad 1500 °C. Mezi lokality s těmito typy písků patří Provodín, Střeleč a Dolní Lhota (Česko), Haltern a Frechen (Německo) a Grudzeń Las (Polsko). Mezi méně vhodné písky s větším obsahem živců (10-25 %) lze zařadit písky říční a váté z období čtvrtohor. Tyto písky mohou mít tendence ke spékání už při teplotách nad cca 1420 °C. Mezi lokality s těmito písky patří Šajdíkovy Humence (Slovensko) a Bzenec (Česko). [35; 43]



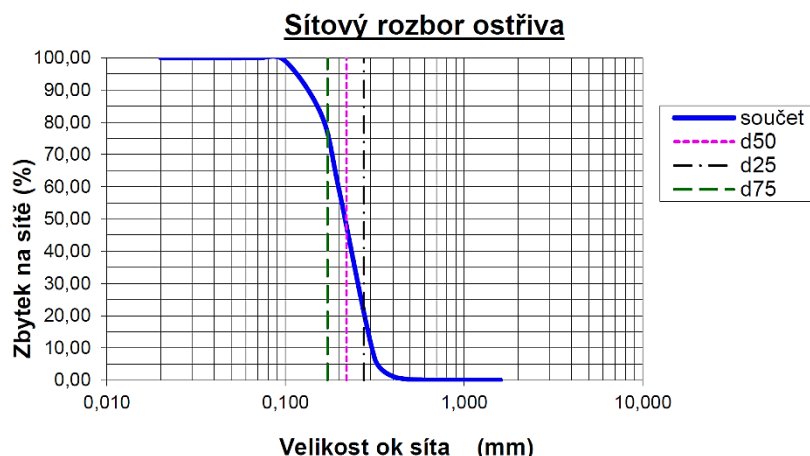
Obr. 39 Spékavost ostřiv při 1600 °C, vlevo Šajdíkovy Humence, vpravo Grudzeń Las [44].

V rámci volby ložiska ostřiva je nutno brát v potaz druh pojiva formovací směsi, druh a velikost odlitku a druh slitiny, který se do formovací směsi má odlévat. Na ostřiva pro jádra je třeba mít obecně přísnější požadavky než na ostřivo pro JBS.

Granulometrie

Pomocí granulometrie je zkoumána zrnitost písku. Z těchto údajů lze vyvodit možnou spotřebu pojiva, prodyšnost výsledné směsi i vhodnost použití daného ostřiva.

Laboratorní zkouška zrnitosti je prováděna pomocí prosítí určitého množství písku (nejčastěji 100g) přes sadu deseti sít s normalizovanou velikostí ok. Po rozložení ostřiva na sítěch jsou údaje o zrnitosti zapsány nejčastěji pomocí tzv. součtové křivky zrnitosti, je ale též možno zaznamenat údaje pomocí histogramu. V případě součtové křivky jsou na ose x vyznačeny hodnoty velikosti ok sít. Na nich jsou vyneseny kumulativní údaje o zrnitosti, kdy se postupně vynáší procentuální množství ostřiva, které zůstalo na daném síti a sítěch pod ním. [35; 43]



Obr. 40 Součtová křivka zrnitosti ostřiva GL 21 firmy H-GLOST s.r.o. (viz Příloha 1)

Z křivky lze pak také stanovit průměrnou velikost zrna d_{50} , spolu s ním je důležitá i hodnota stupně stejnorodosti. Ten je vypočítán jako poměr rozměrů zrna d_{75} ku d_{25} a ukazuje, jak se skladba daného ostřiva blíží monofrakci. V případě monofrakce by poměr byl 1 a veškerá zrna by měla stejnou velikost. [35; 43]

Druhým parametrem, kterým lze směsi hodnotit je parametr AFS. Ten pracuje na principu násobení množství na daném síti přiřazeným koeficientem předchozího síta. Čím je jemnější síto, tím vyšší je koeficient (např. $850 \mu\text{m} = 20$, $75 \mu\text{m} = 200$). Součet všech těchto výsledků je pak podělen celkovým množstvím, které bylo proseto. Údaj AFS poukazuje na celkové rozložení na sítích, čím vyšší je jeho hodnota, tím je ostřivo obecně jemnější. Z obou údajů d_{50} a stupně stejnorodosti lze tedy získat poměrně jasnou představu o granulometrickém složení ostřiva.

V rámci problematiky penetrací jsou granulometrické údaje důležité především proto, že jemnější a nestejnoroďší směs snižuje prodyšnost a zvyšuje spotřebu pojiva. Pro jádra je proto vhodnější spíše hrubší ostřivo. Z pohledu penetrací je naopak vhodnější ostřivo jemnější. Je tedy třeba hledat kompromis. V obou případech je vhodné, aby bylo ostřivo poměrně stejnorodé a s malým množstvím jemných podílů. V příručce slévače firmy Foseco [31] je doporučováno d_{50} okolo 0,25-0,3 mm a AFS 45-65, rozložením z 95 % na 3-5 sítích. V případě bentonitových směsí větší nestejnoroďost nevádí, stejně tak, jako nejsou problémem jemnější podíly, které jsou zde i přímo vyžadovány. Obecné doporučení ve výše zmíněné příručce [31] je d_{50} přibližně 0,22-0,25 mm a AFS 50-60, rozložením z 95 % na 4-5 sítích. [35; 43]

3 TEORETICKÉ ŘEŠENÍ EXPERIMENTU

V části práce věnující se teoretickému řešení experimentu jsou aplikovány teoretické znalosti nabyté v rámci teoretické rešerše (kapitola 2) na řešenou reálnou situaci ve slévárně MAT Ueckermünde.

Jak je uvedeno v úvodu, je řešeným problémem predikce penetrace cold-boxových jader po výměně ostřiva za jemnější. Jádra jsou používána v systému jednotné bentonitové směsi na lince Disamatic. Odlitky i jádra, kterých se řešení týká, jsou poměrně malých rozměrů – odlitky v rozmezí 3-5 kg, jádra o hmotnostech okolo 0,5 kg.

Penetracím taveniny do jádrové směsi je ve slévárně MAT Ueckermünde zabraňováno používáním nátěrů na organické či vodní bázi aplikovaných máčením – v případě organických ručně, v případě vodních roboticky. Organická báze je používána z důvodu rychlého schnutí a eliminace stékání kapek při ručním máčení. V případě vodní báze je stékání kapek eliminováno pomocí optimalizovaného pohybu robota. V rámci ekonomických úspor, zlepšení pracovního prostředí a ekologických opatření by bylo ideální eliminovat používání nátěrů, popř. zvolit vhodný levnější a ekologičtější nátěr na vodní bázi. Eliminace nátěrů, popř. snížení jejich aplikační hustoty by bylo teoreticky možno dosáhnout vlivem výše uvedené změny jádrového ostřiva za jemnější, jelikož by tímto zásahem došlo ke zmenšení pórovitosti směsi.

3.1 Druhy použitého ostřiva a jeho vlastnosti

V rámci řešení je třeba definovat a vyhodnotit použité ostřivo jak z hlediska mineralogické čistoty a původu, tak z hlediska zrnitosti, reprezentované hodnotami d_{50} , či parametrem AFS. Mineralogická čistota má vliv především na chování písku při vyšších teplotách (viz podkapitola 2.4.3). Zrnitost ovlivňuje velikost pórů ve výsledném jádře nebo formě, což má přímý vliv na odolnost proti mechanické penetraci kovu do formovací/jádrové směsi, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole (viz podkapitola 2.2.1).

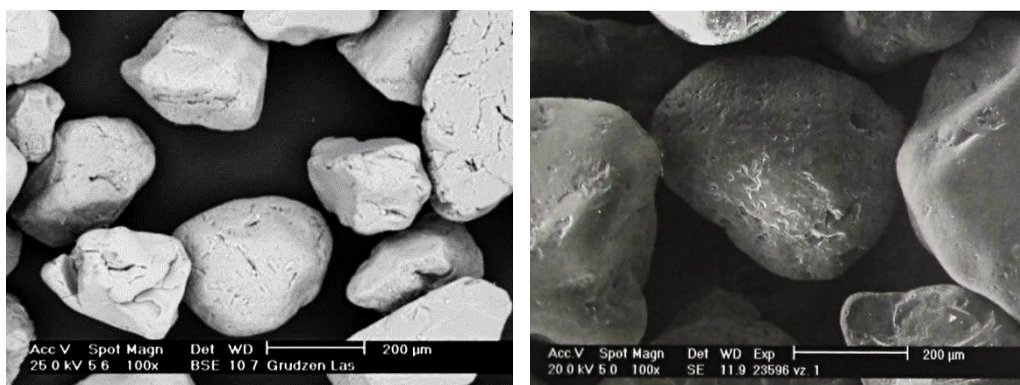
Ostřiva pro MAT Ueckermünde jsou dodávána českou firmou H-GLOST s.r.o. V práci budou používaná ostřiva od této firmy nazývána jejich produktovými názvy (GL 27, GL 21 a GL 16).

3.1.1 Vyhodnocení mineralogické čistoty použitého ostřiva

Jak bylo zmíněno v podkapitole 2.4.3, původ použitého ostřiva je při řešení penetrací velmi důležitý, a to kvůli obsahu možných nečistot. Ostřiva s větším podílem živců se při vyšších teplotách spékají a mohou tak podporovat penetraci.

Ostřivo používané na jádra je v řešeném případě tvořeno pískem z lokality Grudzeń Las (Obr. 41). Tyto písky mají původ v mělkomořských a ledovcových píscích z období křídý. Svou čistotou a kvalitou patří mezi jedny z nejčistších v okolí ČR s čistotou min. 99% SiO_2 a spékavostí nad 1550 °C. [35]

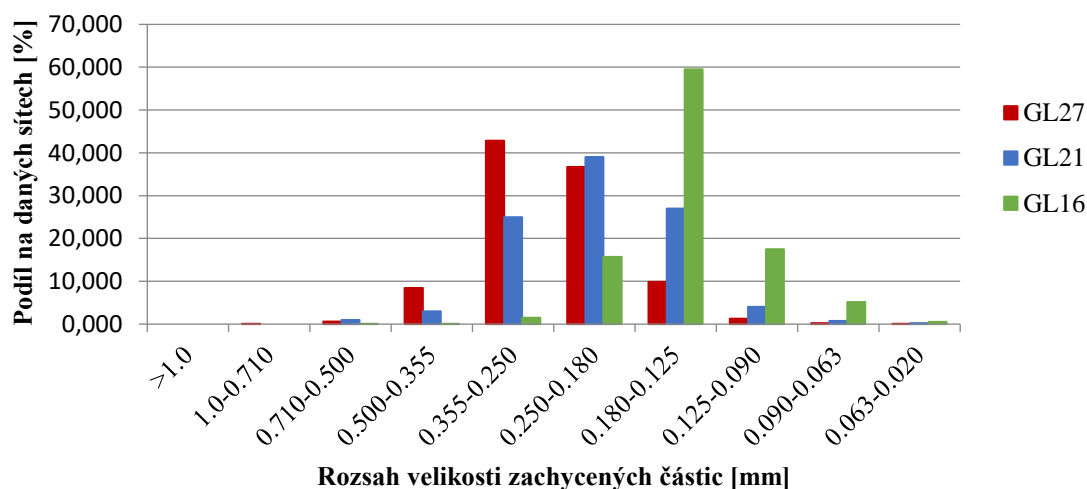
Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem lze předpokládat, že používané ostřivo nebude mít v řešeném případě z hlediska mineralogické čistoty na tvorbu vad typu připečeniny negativní vliv. Proto je možné zaměřit větší pozornost na další faktory penetrace.



Obr. 41 Mikroskopická fotografie ostřiva z lokality Grudzeń Las [45].

3.1.2 Zrnitost ostřiva

Z hlediska zrnitosti ostřiva je používáno ostřivo GL 27 s velikostí průměrného zrna 0,27 mm (AFS 52). Pokud by mělo dojít ke zvýšení jemnosti, umožňuje dodavatel zvolit mezi verzemi GL 21 s $d_{50} = 0,21$ mm (AFS 63) a GL 16 s $d_{50} = 0,16$ mm (AFS 84). Na technických listech (Příloha 1, Příloha 2 a Příloha 3) a vypracovaném histogramu (Obr. 42) však lze vidět, že v jemnějším ostřivu 0,16 mm je oproti dvěma hrubším variantám podstatně víc jemných podílů, které by mohly jednak radikálně snižovat prodyšnost jádrové směsi a jednak zvyšovat spotřebu pojiva. Z tohoto důvodu je v případě změny jádrového písku použito ostřivo GL 21.



Obr. 42 Histogram zobrazující granulometrické rozložení ostřiv. Rozbory byly pořízeny v MAT Ueckermünde.

3.2 Odhad penetračního indexu

Odhad penetračního indexu pomocí rovnice (10), a pomocí rovnic určující kritický (11) a skutečný (12) úhel smáčení pomáhá predikovat možnost mechanické penetrace. Za pomoci této predikce lze porovnat vliv změny jádrového písku z GL 27 na GL 21. Predikce je následně ověřena v experimentální části.

Odhadem je výpočet nazván zvláště proto, že v praktickém využití je velké množství proměnných, které výpočet nemůže reálně pojmut. Nicméně jako odhad může výpočet fungovat a pokud bude penetrace predikovat, lze předpokládat, že při reálném využití nastanou.

3.2.1 Vstupní parametry pro výpočty penetračního indexu

Vstupními parametry jsou zde údaje, dodané slévárnou MAT Ueckermünde, případně údaje odpovídající experimentu z podkapitoly 4.2.3. Ve výpočtech je odhadována statická penetrace jádrové směsi, tudíž je zanedbán vliv dynamické penetrace, a to zvláště z důvodu proměnlivého účinku proudu kovu jak z pohledu místa ovlivnění, tak z pohledu proměnlivé rychlosti proudu taveniny v zárezu. V případě parametrů, které umožňují určitý rozptyl hodnot, je uvažována vyšší hodnota, a to z důvodu predikce situace při vyšší zátěži.

Vstupní parametry pro rovnice výpočtu penetračního indexu (10), (11) a (12) z podkapitoly 2.2.1 (část *Penetrační index*) uvádí Tabulka 3.

Tabulka 3 Vstupní hodnoty pro výpočty penetračního indexu dle rovnic (10), (11) a (12).

d_p	-	- přibližná hodnota velikosti pórů jádrové směsi vypočtená ze vzorce $d_p \cong 2 \cdot 0,22 \cdot d_{50}$ [25] (20)
	$118,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	- pro ostřívo s $d_{50} = 0,27 \text{ mm}$
	$92,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	- pro ostřívo s $d_{50} = 0,21 \text{ mm}$
γ_{LV}	$1,8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	- přibližná hodnota povrchového napětí odvozená z grafu na Obr. 22 a údajů z práce <i>Mold Penetration in Sand Molds</i> [25]
$\rho_{\text{litina-1}}$	$6 \text{ 900 kg} \cdot \text{m}^{-3}$	- přibližná hodnota hustoty litiny v tekutém stavu
g	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	- gravitační konstanta
h	$0,57 \text{ m}$	- největší metalostatická výška, které jsou zkoumaná jádra vystavena na DISA 250-C v provozu MAT Ueckermünde
	$0,62 \text{ m}$	- zvýšená hodnota metalostatické výšky – přidáno navýšení o 50 mm pro ztížení podmínek (viz podkapitola 4.1.1)
T	$1415 \text{ }^\circ\text{C}$	- lící teplota na vyšší hodnotě rozmezí teplot odlévaného kovu v provozu MAT Ueckermünde

Složení kovu bylo stanoveno tak, aby přibližně odpovídalo složení kovu EN-GJS-500-7 s mírně zvýšeným obsahem Mn podle specifik chemického složení kovu v MAT Ueckermünde. Do výpočtu bylo z důvodu srovnatelnosti zpětně dosazeno přesné složení, které bylo využito při experimentu.

Tabulka 4 Složení kovu použitého pro experiment v podkapitole 4.2.3.

Prvek	C	Si	Mn	S	P	Mg _{zbyt}
% v kovu	3,78	2,34	0,37	0,012	0,016	0,049

3.2.2 Výpočet penetračního indexu

V rámci experimentu byla zkoumána a porovnávána jádra ze dvou druhů ostřiv – GL 27 a GL 21. Tvorba vad typu připečeniny na nich byla zkoumána ve dvou situacích, a to v podmínkách provozních a ztížených. Provozní podmínky odpovídají metalostatické výšce 570 mm, což je maximální metalostatická výška, které jsou jádra vystavena v provozu

MAT Ueckermünde. Ztížené podmínky odpovídají provozním s navýšením metalostatické výšky o 50 mm na výsledných 620 mm. Smyslem testu ve ztížených podmínkách bylo zjištění odolnosti jader proti tvorbě připečenin při případném zhoršení kteréhokoli z provozních faktorů, ovlivňujících mechanickou penetraci (viz podkapitola 2.2.1). Pokud tedy k penetraci směsi nedojde ve ztížených podmínkách, lze předpokládat, že k nim nebude docházet ani při běžných variacích technologických či provozních parametrů.

Výpočet kritického úhlu smáčení

Kritický úhel smáčení je parametr podmínek formy. Pokud bude skutečný úhel smáčení formovací směsi taveninou nižší než úhel kritický, bude směs smáčena. Čím bude tedy nižší hodnota kritického úhlu, tím bude mechanická penetrace formovací směsi méně pravděpodobná.

Vzhledem k informacím uvedeným výše bylo tedy potřeba provést čtyři výpočty kritického úhlu smáčení. Pro každé z testovaných ostřív (GL 27, GL 21) byl proveden výpočet pro provozní metalostatickou výšku a pro navýšenou výšku v rámci ztížených podmínek.

- **Ostřívo GL 27 – provozní podmínky ($d_{50}= 0,27$ mm; $h= 0,57$ m)**

Zde je testováno hrubší ostřívo GL 27. Metalostatická výška je 570 mm. Tyto podmínky jsou výchozími ve slévárně MAT Ueckermünde.

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{118,8 * 10^{-6}}{4 * 1,8} * (6900 * 9,81 * 0,57) \right] = 129,5^{\circ} \quad (21)$$

- **Ostřívo GL 27 – ztížené podmínky ($d_{50}= 0,27$ mm; $h= 0,62$ m)**

V tomto případě jde o ztížené podmínky metalostatické výšky spolu s původním ostřívem. Jde o nejhorší možnou variantu pro výpočet kritického úhlu smáčení.

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{118,8 * 10^{-6}}{4 * 1,8} * (6900 * 9,81 * 0,62) \right] = 133,8^{\circ} \quad (22)$$

- **Ostřívo GL 21 – provozní podmínky ($d_{50}= 0,21$ mm; $h= 0,57$ m)**

Tento případ představuje nejmenší riziko penetrace taveniny do směsi. Je zde použito jemnější ostřívo a testovaná metalostatická výška je provozní.

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{92,4 * 10^{-6}}{4 * 1,8} * (6900 * 9,81 * 0,57) \right] = 119,7^{\circ} \quad (23)$$

- **Ostřívo GL 21 – ztížené podmínky ((d₅₀= 0,21 mm; h= 0,62 m)**

Zde je počítán kritický úhel smáčení pro nové jemnější ostřívo při ztížených podmínkách.

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{92,4 * 10^{-6}}{4 * 1,8} * (6900 * 9,81 * 0,62) \right] = 122,6^{\circ} \quad (24)$$

Nejhorší výsledek kritického úhlu smáčení byl pro ostřívo GL 27 a metalostatickou výšku 620 mm ($\theta_{cr}= 133,8^{\circ}$). Naopak nejlepší výsledek byl dosažen při použití ostřiva GL 21 s metalostatickou výškou 570 mm ($\theta_{cr}= 119,7^{\circ}$).

Výpočet skutečného úhlu smáčení

Rovnice skutečného úhlu smáčení (12) má svými autory [18] určené limity obsahů jednotlivých prvků (viz podkapitola 2.2.1 část *Penetrační index*). Do těchto obsahů její autoři garantují dostatečnou přesnost rovnice v rámci regrese, kterou byla vytvořena. Jelikož byl v rámci experimentu (podkapitola 4.2.3) použit kov s obsahem manganu a uhlíku nad limitními hodnotami rovnice, nemusí být v tomto případě výpočet dostatečně přesný. Velikost případné chyby nelze určit.

Z výše uvedeného důvodu je prvotní výpočet dosazen s obsahy prvků sníženými na hodnoty, při kterých autoři rovnice [18] garantují její přesnost. Pro druhý případ byl výpočet proveden se skutečnými hodnotami složení experimentální tavby pro získání alespoň přibližného náhledu na situaci při daném chemickém složení kovu.

- **Výpočet z hodnot v rozmezí garantované platnosti rovnice**

V tomto případě byly hodnoty obsahů prvků sníženy na maximální hodnoty, které autoři rovnice (12) ve své práci *Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II* [18] uvádí. Oproti skutečnému kovu, který byl později použit při experimentu (Tabulka 4) byl snížen obsah manganu (z 0,37 % na 0,13 %) a obsah uhlíku (z 3,78 % na 3,67 %).

Tabulka 5 Složení kovu v rámci tolerancí rovnice.

Prvek	C	Si	Mn	S	P
% v kovu	3,67	2,34	0,13	0,012	0,016

Po dosazení hodnot do rovnice (12) bylo zjištěno, že pro upravené složení kovu je θ_A roven $27,8^{\circ}$.

- **Výpočet za použití reálných hodnot tavby**

Při použití skutečného složení kovu (viz Tabulka 4), který byl použit v rámci experimentální tavby, bylo vypočteno, že je θ_A roven $8,4^{\circ}$.

Vlastní výpočet penetračního indexu

S ohledem na vypočtené hodnoty lze vypočítat dle rovnice (10) penetrační index. Penetrační index je vypočten pro nejhorší a nejlepší případ kritického úhlu smáčení (viz dříve – *Výpočet*

kritického úhlu smáčení). Z hlediska chemického složení kovu je vypočten jak pro chemické složení v rozmezí platnosti rovnice (12), tak pro složení skutečné.

Tabulka 6 Shrnutí vypočtených hodnot pro výpočet penetračního indexu.

	Skutečný úhel smáčení θ_A	Kritický úhel smáčení (nejhorší)	Penetrační index P (nejhorší)	Kritický úhel smáčení (nejlepší)	Penetrační index P (nejlepší)
Upravené chemické složení (Tabulka 5)	27,8°	133,8	0,21	119,7	0,23
Chemické složení tavby (podkapitola 4.2.3)	8,4°	133,8	0,063	119,7	0,07

Pro chemické složení se sníženými obsahy Mn a C (Tabulka 5) vyšel penetrační index 0,21 pro nejhorší podmínky a 0,23 pro podmínky nejlepší.

Pro reálně použité hodnoty je penetrační index 0,063 pro podmínky nejhorší a 0,07 pro nejlepší.

Pro vyloučení mechanické penetrace taveniny do jádrové směsi je třeba, aby byl penetrační index větší, nebo alespoň roven jedné (viz podkapitola 2.2.1 část *Penetrační index*). Veškeré vypočtené hodnoty penetračního indexu jsou podstatně menší než jedna. Z toho lze predikovat, že formovací směs bude smáčena kovem a mechanická penetrace bude nastávat v každém případě, nezávisle na zrnitosti ostřiva jádrové směsi.

3.3 Testované žáruvzdorné nátěry

Ke komplexnímu testu nátěrů byly slévárnou MAT Ueckermünde dodány tři nátěry od tří různých firem. Ve všech případech jde o nátěry na vodní bázi a navržené pro použití na jádra při odlévání litin. Cílem testování nátěrů bylo zjistit, který z nátěrů tvoří nejlepší ochranu jader proti penetracím při různých ředěních nátěru. Hodnoceno bylo také ekonomické hledisko, konkrétně na kolik lze původní koncentrát nátěru naředit na danou testovanou hustotu.

Tabulka 7 Testované vodní nátěry a jejich vlastnosti udané výrobcí.

	Nátěr č. 1	Nátěr č. 2	Nátěr č. 3
Barva	Červeno-hnědá	Světle šedá	Načervenalá
Složení plniva	Aluminosilikáty s příměsí grafitu a oxidu železa	Aluminosilikáty s příměsí grafitu	Křemičitany s příměsí grafitu a oxidu železa
Podíl pevných částic	~ 45 %	~ 37 %	~ 48 %
Hustota	~ 1,4 g*cm ⁻³	~ 1,25 až 1,35 g*cm ⁻³	~ 1,38 až 1,35 g*cm ⁻³



Obr. 43 Jednotlivé nátěrové koncentráty, zleva nátěr č. 1, č. 2 a č. 3.

3.4 Vliv výměny ostřiva na JBS

Vliv jádrového ostřiva na JBS spočívá především v ovlivnění regenerované směsi. Zvláště v provozech s malými jádry většina pojiva podléhá termodestrukci a zbytek jádrové směsi (resp. jádrového ostřiva) je ponechán ve směsi. Tím dochází v rámci regenerace směsi k soustavnému přidávání nového ostřiva (ve formě jádrového regenerátu) do JBS. To má za následek několik negativních efektů.

3.4.1 Spotřeba bentonitu

První efekt je založen na množství nového ostřiva ve směsi. Nové ostřivo je totiž nutno obalit novým bentonitem pro zachování vlastností směsi. Bentonitová směs jako taková sice potřebuje určitou regeneraci v podobě přidávání nového ostřiva, může se však stát, že je jádrového ostřiva více, než je potřeba pro samotnou regeneraci. Vzhledem k tomu je možné, že bude potřeba obalit více ostřiva, než by bylo bezpodmínečně nutné – zvyšuje se tak spotřeba bentonitu.

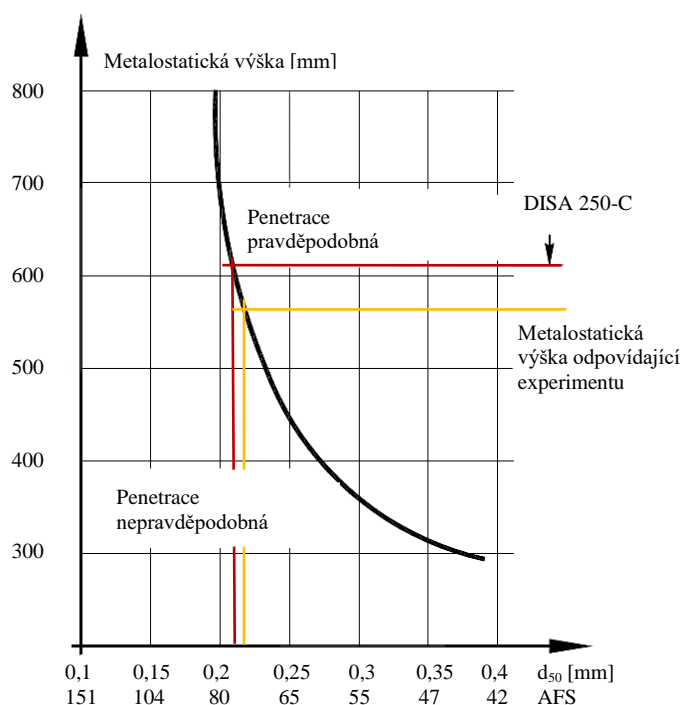
3.4.2 Přebytek směsi v systému

Druhým efektem je přidávání většího množství nového písku ve formě jader, než je třeba k vlastní regeneraci směsi. V takovém případě se totiž do směsi dostává více ostřiva, než z ní přirozeně odchází (v podobě prachu při postupné termodestrukci, při spadu z dopravníků atp.). Z toho důvodu pak dochází k postupnému hromadění směsi v systému. S tím se pojí jednak finanční ztráta z důvodu deponování přebytečné směsi se stále použitelným ostřivem a bentonitem, jednak vlastní finanční náklady za deponování směsi. Zvláště zmíněné poplatky za deponování směsi, související se zvyšujícími se nároky na ekologii, mají nezanedbatelný podíl na nákladech sléváren.

3.4.3 Ovlivnění granulometrie JBS

Posledním efektem, který má jádrové ostřivo na JBS, je ovlivnění její granulometrie. Ani tento vliv není zanedbatelný, a to především z hlediska penetrační formovací směsi. Bentonitová směs totiž potřebuje určitý podíl jemných částic (ostřiva i neaktivního jílu) pro zachování svých vlastností a odolnosti proti penetracím.

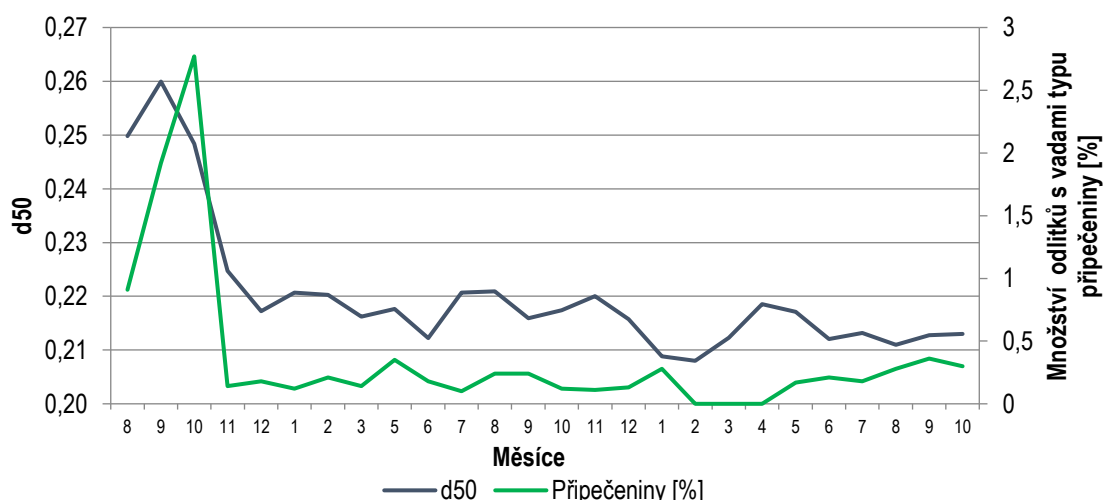
Manuál společnosti DISA [46] uvádí, že pro případ linky DISA 250-C by se měl obsah vyplavitelných podílů pohybovat mezi 2,5 – 4 %. Vyplavitelné podíly mají za cíl především vyplnění mezer mezi zrny a tím prevenci penetrací. Také slouží ke snížení citlivosti systému na nepřesné dávkování vody, jelikož absorbují její přebytky. Vyplavitelné látky pocházejí především ze spáleného bentonitu, uhlikatých přísad a z prachu, vzniklého degradovaným pískem. Jádrový písek však těchto částic obsahuje minimum, proto se jejich podíl může mírně snižovat. [46]



Obr. 44 Graf doporučující zrnitost ostřiva v závislosti na metalostatické výšce pro linky DISA [46].

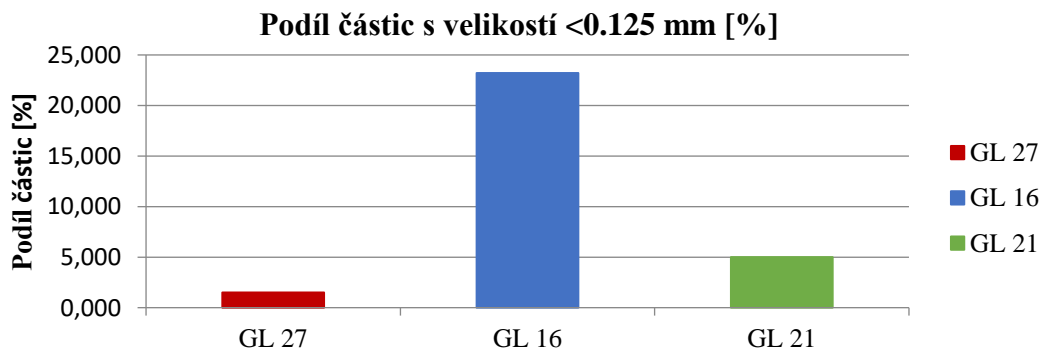
Větším problémem však může být ovlivnění granulometrie vlastního ostřiva. Bentonitová směs potřebuje totiž pro zachování vlastností (zvláště odolnosti proti penetracím) podstatně nižší zrnitost ostřiva. Pro srovnání: pro chemicky pojené systémy je doporučovaná hodnota

d_{50} 0,25-0,3 mm a AFS 45-60 [31], oproti tomu DISA uvádí, že bentonitová směs pro linky Disamatic řady 250/2070 by měla obecně mít d_{50} nejvíce 0,18 mm a AFS nejméně 90 [46]. Tyto hodnoty jsou sice poměrně nízké, jelikož jsou navrhovány s rezervami, nicméně i přesto je rozdíl více než patrný. Z grafu (Obr. 44), který DISA poskytuje firmám k přesnějšímu stanovení potřebné zrnitosti a ze statistických provozních hodnot získaných od slévárny MAT Ueckermünde (Obr. 45), vyplývá, že pro danou linku je dostatečná hodnota pro prevenci penetrací d_{50} 0,21-0,22 a AFS 70-71. Dostatečně nízkou zrnitost směsi v MAT Ueckermünde také dosahují pomocí procentuálního podílu částic s velikostí pod 0,125 mm v ostřivu. Podíl těchto částic by měl na lince Disamatic 250-C tvořit přibližně 10 % směsi.



Obr. 45 Vztah mezi d_{50} a množstvím vad typu přípečeniny v MAT.

V případě, že je ale do JBS s optimalizovanou hrubostí směsi $d_{50} = 0,21$ mm přidáváno hrubší ostřívo GL 27 s $d_{50} = 0,27$ mm (Obr. 46), musí nutně docházet k postupnému hrubnutí směsi na hodnoty, které nemohou být dostatečné pro prevenci penetrací formy. Řešením může být v takovém případě dávkování dalšího nového ostřiva s podstatně nižší zrnitostí (dále kompenzačního). Tímto kompenzačním ostřivem je hrubé ostřívo jader kompenzováno – princip ukazuje Tabulka 8. Toto opatření ale ještě zvyšuje negativní ekonomické efekty zmíněné výše.



Obr. 46 Graf zobrazující poměr podílů částic <0,125 mm ve zkoumaných ostřivech. Data byla získána ze síťových rozborů provedených v MAT Ueckermünde.

Tabulka 8 Názorná ukázka mísení ostřiv po vytlučení forem.

Degenerovaná JBS z forem – optimalizovaná zrnitost AFX X		Regenerovaná JBS – optimalizovaná zrnitost AFS X
Ostřívo z rozpadlých jader (GL27/GL21) – hrubší zrnitost AFS $Y < X$		
Kompenzační ostřívo (GL16) – jemnější zrnitost AFS $Z > X$		

Výměnou jádrového ostříva GL27 za GL21 by došlo ke zvýšení obsahu jemných částic (s velikostí pod 0,125 mm) v regenerátu JBS, které by do něj přicházely přímo ze zničených jader. Díky tomu by bylo možné snížit dávkování kompenzačního nového ostříva do regenerované JBS.

3.5 Ekonomický dopad případných opatření

Nahrazení jádrového ostříva GL27 jemnějším ostřivem GL21 může mít několik ekonomických dopadů.

Je možné, že jemnější ostřívo jádrové směsi bude odolnější vůči penetracím z důvodu menších pórů. Výpočty ukázaly, že penetraci pravděpodobně nebude možno zabránit pouze s pomocí jemnějšího ostříva. I přesto je možné, že díky menším pórům nebude potřeba velké tloušťky nátěru a nátěry by mohly být ředěny na nižší hustotu s dostačující efektivitou. V takovém případě by se mohly snížit provozní náklady slévárny MAT Ueckermünde z důvodu nižší spotřeby nátěrů.

Jemnější ostřívo také sníží nutnost dávkování kompenzačního nového ostříva do směsi. Původní předpoklad byl, že by se dávkování mohlo snížit až o 50 %. Tím by došlo primárně ke snížení nákladů na kompenzační ostřívo, sekundárně ale také ke snížení nákladů na bentonit a uhlíkaté přísady, nutné k pokrytí nového ostříva v regenerátu JBS. Terciárně by pak byly sníženy náklady za deponování přebytečné směsi

Posledním úsporným efektem je nalezení vhodného nátěru, který by bylo v optimálním případě možno dostatečně ředit a jehož vlastnosti by předcházely možným vadám, zvláště pak připečeninám.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY

Experimentální zkoušky měly za cíl ověřit teoretická řešení provedená v předchozí kapitole. Mezi experimentální zkoušky je zařazen laboratorní test nátěrů, test vlivu jádrového ostřiva na JBS a zkoušky penetrací jader taveninou.

- Laboratorní test nátěrů měl za cíl otestovat tři žáruvzdorné vodní nátěry, dodané slévárnou MAT Ueckermünde (viz podkapitola 3.3).
- Test vlivu změny jádrového ostřiva na JBS měl za cíl ověřit problematiku nastíněnou v podkapitole 3.4 přímo pro měněná ostřiva.
- Praktická zkouška zapékání jader měla za cíl ověřit intenzitu zapékání jader pro zkoumaná ostřiva GL 27 a GL 21. Také v něm byla zkoumána účinnost jednotlivých nátěrů z laboratorního testu při různém naředění. Hodnocena zde byla kvalita povrchu jak v surovém stavu, tak po otryskání pískem. Zkouška byla prováděna tak, aby simulovala podmínky formy na lince Disamatic ve slévárně MAT Ueckermünde.

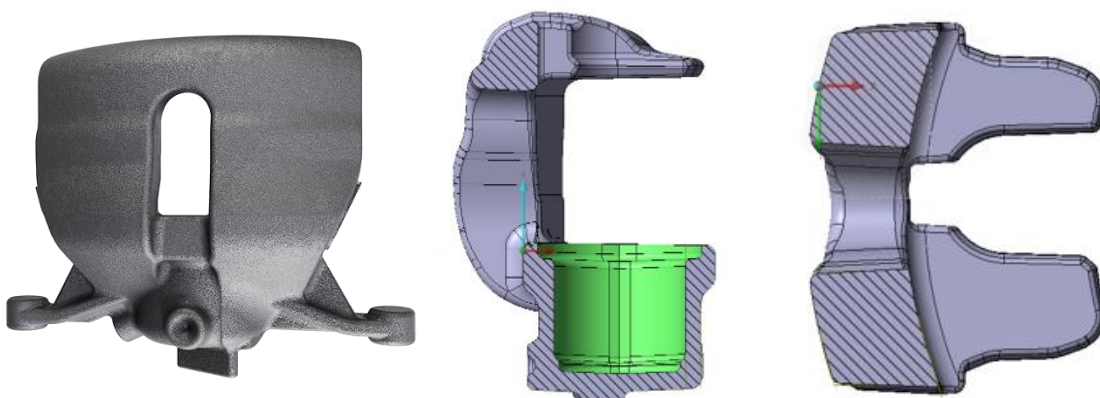
4.1 Příprava experimentu

V rámci příprav experimentu bylo třeba definovat zkušební odlitek a jádro. Ty byly navrženy na základě skutečného odlitku a jádra z MAT Ueckermünde. Zkušební jádro i odlitek byly upraveny tak, aby skutečným odpovídaly zvláště parametry, které ovlivňují zkoumané připečeniny.

Dále bylo nutné navrhnout a zhotovit jaderník a modelové zařízení pro výrobu forem. V poslední fázi příprav experimentu bylo potřeba zhotovit samotná zkušební jádra a zaformovat formy.

4.1.1 Návrh zkušebního jádra a odlitku

Návrh zkušebního odlitku a jádra byl založen na údajích, dodaných firmou MAT Ueckermünde (Obr. 47, Obr. 48).

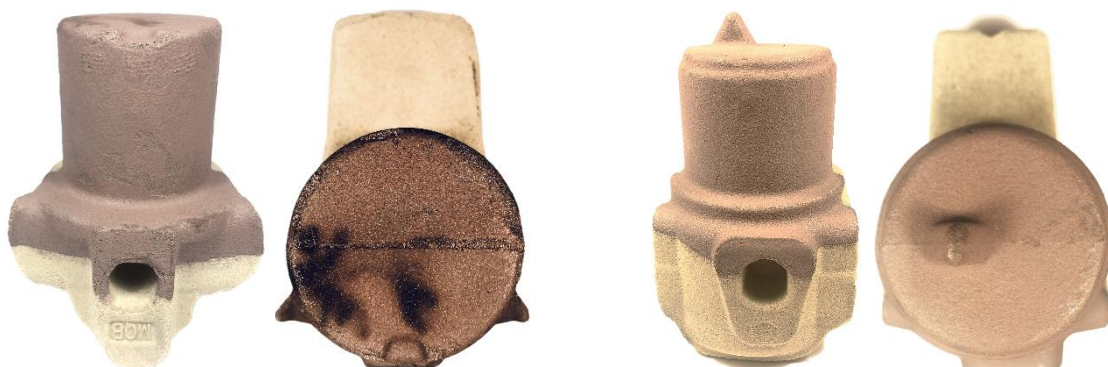


Obr. 47 Odlitek firmy MAT Ueckermünde, na kterém se projevuje problematika připečenin [2].
Zelená dutina v řezu (uprostřed) je dutina tvořená zkoumanými jádry.

Návrh zkušebního jádra

Jádra z provozu MAT Ueckermünde, kterých se problematika připečenin týká, mají hmotnost cca 450 g. V přímém kontaktu s kovem je však pouze menší část, jelikož je jádro zasazeno ve formě.

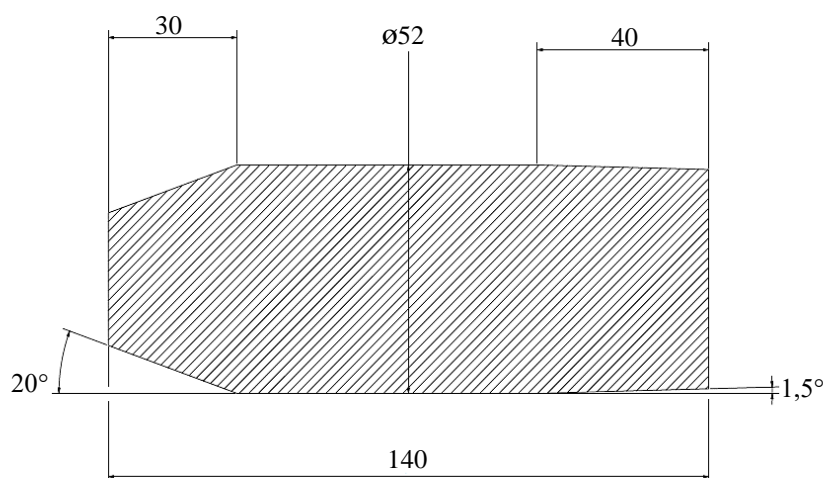
Tvar a velikost zkušebního jádra byla volena tak, aby byla v důležitých parametrech srovnatelná se skutečnými jádry z MAT Ueckermünde. Rolí zde hraje především plocha jádra, která je v přímém kontaktu s taveninou, a průměr jádra. Tyto údaje jsou důležité především pro zajištění odpovídajícího tepelného zatížení jádra. Důležitá je také celková hmotnost jádra, a to pro zachování odpovídající tepelné akumulace jádrové směsi.



Obr. 48 Dvě původní jádra z MAT Ueckermünde. Jádro vlevo bylo hlavní předlohou pro zkušební jádra. Jeho válcová část je vysoká 54 mm a průměr má 52 mm.

Plocha původních jader, která je obklopená kovem, byla určena přibližně, a to jako součet plochy válce, který je tvoří a plochy jedné z podstav.

Navržené zkušební jádro má válcovitý tvar, a to zvláště z důvodu snadnější výroby. Jeho výsledná hmotnost je přibližně 410 g při průměru jádra 52 mm a celkové výšce 140 mm. Z celkové délky jádra tvoří 30 mm délka vrchní známky a 40 mm délka spodní známky (Obr. 49). Kovem smáčená část je uprostřed a má délku 70 mm. Mírně nižší hmotnost zkušebního jádra oproti původním jádrům byla zvolena z důvodu zpřísnění podmínek experimentální zkoušky.

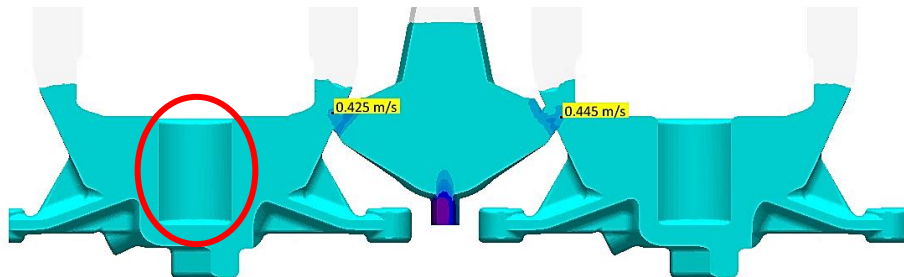


Obr. 49 Nákres zkušebního jádra v řezu.

Návrh zkušební odlitku

Při návrhu zkušební odlitku bylo třeba vzít v potaz dva faktory: plochu zkušební jádra, která má být v kontaktu s tekutým kovem, a hmotnost kovu, který by měl být v kontaktu se zkušebním jádrem. Jelikož rozměry zkušební jádra byly stanoveny výše, bylo k němu potřeba ještě stanovit množství kovu a navrhnout potřebný tvar zkušební odlitku.

Původní odlitky MAT Ueckermünde, jejichž tepelné působení na jádro je třeba navodit, jsou brzdovými třmeny (Obr. 47). Hmotnost těchto třmenů se pohybuje okolo 4-4,5 kg. Jádro však přímo ovlivňuje (zvláště předaným teplem) menší část kovu (Obr. 47). Z fotografií simulace plnění, získaných od MAT Ueckermünde, bylo odhadnuto, že tato část kovu může tvořit přibližně 65-70 % hmotnosti odlitku (Obr. 50). Proto byl zkušební odlitek navržen s hmotností 3 kg, která jsou v přímém kontaktu se zkušebním jádrem.



v22
Pouring, Velocity
5.000s, 65.42 %

Obr. 50 Fotografie ze simulace plnění odlitku brzdového třmenu získaná od MAT Ueckermünde. Vlevo zakroužkovaný prostor jádra, v tomto momentě (65 % plnění) již plně pod hladinou kovu.

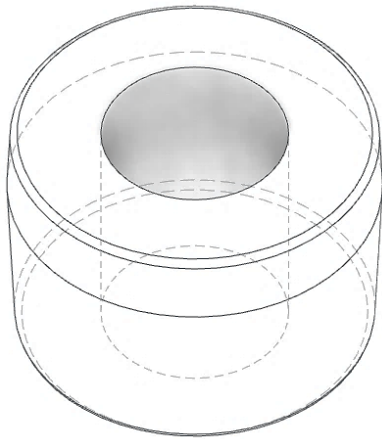
V rámci jednoduchosti výroby modelového zařízení byl odlitek navržen jako mezikruží (Obr. 51), v jehož středu se nachází zkušební jádro. Vnitřní průměr mezikruží byl dán průměrem jádra, tedy 52 mm. Vnější průměr byl stanoven výpočtem (25) na přibližně 100 mm bez úkosů (viz rovnice 19) a z důvodu použití úkosů byl zvýšen na přibližně 104 mm (Obr. 52).

$$m_{\text{odlitek}} = h_{\text{jádro}} * \rho_{\text{litina-s}} * \pi * \left(\frac{D_{\text{vnější}}^2 - D_{\text{vnitřní}}^2}{4} \right)$$

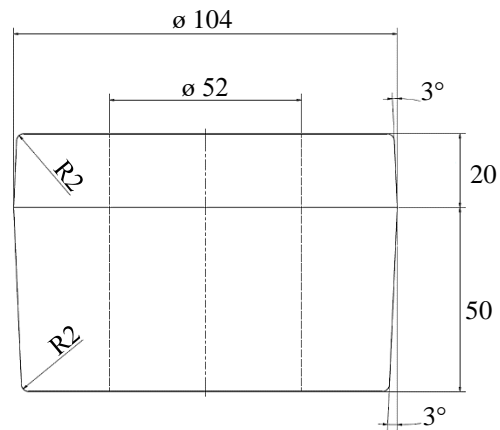
$$3000 = 7 * 7,2 * \pi * \left(\frac{D_{\text{vnější}}^2 - 5,2^2}{4} \right)$$

$$D_{\text{vnější}} = \sqrt{\frac{3000 * 4}{7 * 7,2 * \pi} + 5,2^2} = 10,14 \text{ cm} = 101,4 \text{ mm} \quad (25)$$

kde: m_{odlitek} – hmotnost samotného odlitku [kg],
 $h_{\text{jádro}}$ – výška jádra v odlitku (bez známek) [cm],
 $\rho_{\text{litina-s}}$ – měrná hmotnost litiny v tuhém stavu [g/cm^3],
 $D_{\text{vnější}}$ – vnější průměr mezikruží zkušební odlitku [cm],
 $D_{\text{vnitřní}}$ – vnitřní průměr mezikruží zkušební odlitku [cm].



Obr. 51 3D model navrženého odlitku.

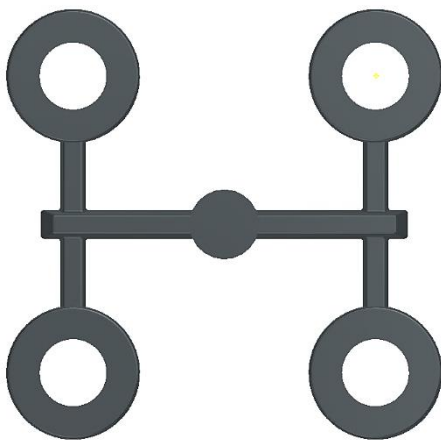


Obr. 52 Náskres navrženého odlitku.

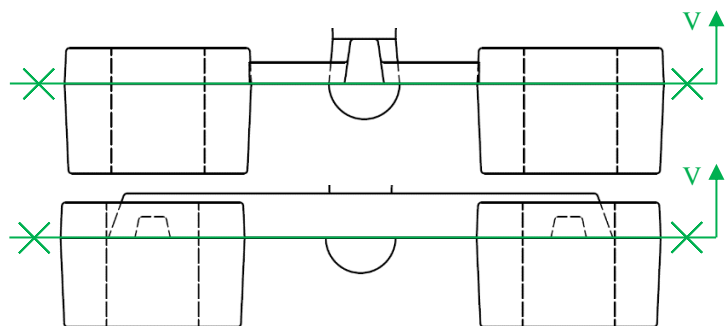
Návrh vtokové soustavy

Vtoková soustava byla navržena tak, aby bylo dosaženo požadovaného metalostatického tlaku, doby plnění a případně rychlostí v zářezech obdobných jako ve formách linky DISA 250-C v MAT Ueckermünde. Výška vtokového kůlu byla navržena na 575 mm (vč. výšky struskového kanálu), což je výška přibližně odpovídající maximální metalostatické výšce, které jsou zkoumaná jádra na lince DISA 250-C vystavena.

Odlitky byly půdorysně umístěny na zářezy a struskový kanál tak, aby byly od sebe vzájemně dostatečně vzdáleny – minimální vzdálenosti mezi nimi činily 125 mm (viz Obr. 53). Odlitek ve vršku formy měl výšku 20 mm, byl na úrovni struskového kanálu a byly zde vyvedeny zářezy. Zbylých 50 mm bylo umístěno ve spodku formy (pod úrovní zářezů) (Obr. 52, Obr. 54). Na odlitku ve vršku formy lze zkoumat případnou erozi jádra ze strany zářezů a účinek nižšího metalostatického tlaku (sloupec ~570 mm) ze strany druhé. Na spodku odlitku lze zkoumat účinek navýšeného metalostatického tlaku (sloupec ~620 mm) pro zajištění kontroly vzniku vad typu připečeniny ve ztížených podmínkách. Zároveň toto řešení zabraňuje tomu, aby byla spodní část odlitku ovlivněna erozí, která by mohla negativně ovlivnit zkoumání penetrace v místech nejvyššího tlaku.



Obr. 53 Vtoková soustava, pohled shora.

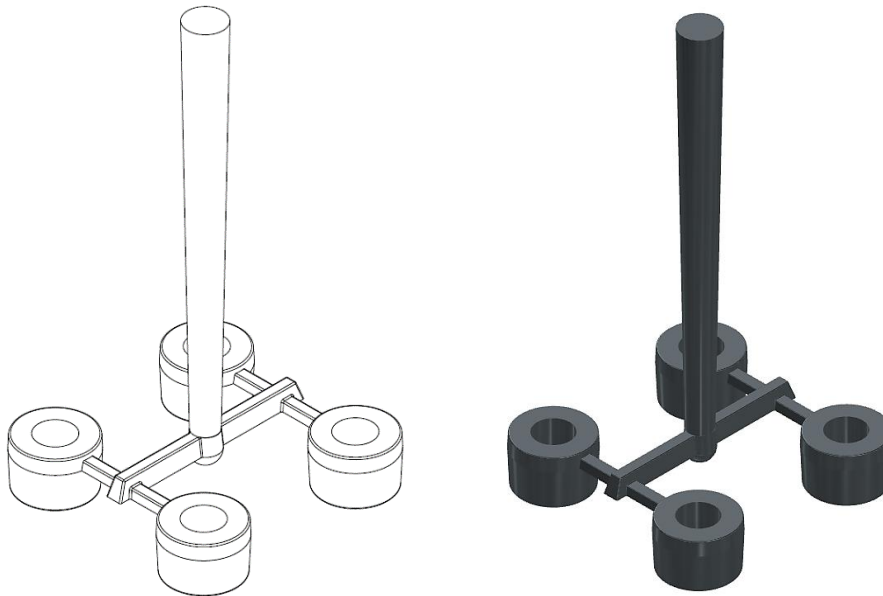


Obr. 54 Náskres odlitků na vtokové soustavě, pohled čelní a boční.

Vtoková soustava byla navržena jako mírně přetlaková v poměru 1: 1,1: 1,15 (zářezy: struskový kanál: vtokový kůl) s řídicím průřezem v zářezech. Velikost řídicího průřezu byla navržena za pomoci Bernoulliho rovnice (26), a to tak, aby doba plnění odlitků přibližně odpovídala době plnění odlitků z MAT Ueckermünde s původními jádry. Přesněji řečeno době plnění té části původních odlitků, které jsou v přímém kontaktu s jádry (Obr. 50).

$$h_0 + \frac{p_0}{\rho_l * g} + \frac{v_0^2}{2 * g} = h_1 + \frac{p_1}{\rho_l * g} + \frac{v_1^2}{2 * g} \quad (26)$$

- kde: p_x – tlak v daném bodě [Pa],
 v_x – rychlost proudění v daném bodě [$m*s^{-1}$],
 ρ_l – hustota litiny v tekutém stavu [$kg*m^{-3}$],
 g – gravitační konstanta [$m*s^{-2}$],
 h_x – výška daného bodu oproti referenční nulové hodnotě [m],
 0 – výchozí bod (volná hladina – licí pánve),
 1 – počítaný bod, v rámci výpočtu jsou jím zářezy.



Obr. 55 Návrh vtokové soustavy.

Návrh zářezů

Přibližný návrh plochy zářezů byl vypočten ze zjednodušené Bernoulliho rovnice (26), kde byly zanedbány hydrodynamické odpory (Y_H). Volná hladina (bod 0) byla uvažována v pánvi, bod, pro který se hodnoty počítaly byl stanoven do spodní části zářezu. Hydrodynamická výška tedy byla stanovena jako součet výšky licího kůlu (575 mm) a přídávku, který počítal s určitou výškou pánve nad vlastním kulem (25 mm). Celková výška tudíž byla stanovena na 600 mm. Atmosférický tlak a rychlost na výstupu z pánve mohly být zanedbány, výsledná rovnice tedy byla ve tvaru viz rovnice (21).

$$\frac{v_1^2}{2} = g * \Delta h \quad (27)$$

Doba plnění byla podle simulace, dodané slévárnou MAT Ueckermünde (Obr. 50), stanovena s rezervou na přibližně 6 s. Ze stanoveného času lze z hmotnosti odlitků ve formě (čtyři odlitky po třech kilogramech) vypočítat potřebný průtok viz rovnice (28). Rovnicí průtoku lze dále stanovit rychlost vyjádřenou z výše uvedené Bernoulliho rovnice (26). Po dosazení bylo z rovnice průtoku (28) možno vyjádřit a vypočítat celkovou plochu zářezů, která zajistí požadovanou dobu plnění viz rovnice (29).

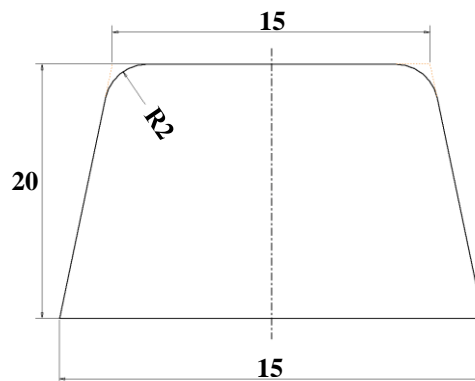
$$Q = \frac{m_{\text{odlitek}}}{t} = \frac{12000}{6} = 2 \text{ kg} * \text{s}^{-1} \quad (28)$$

$$Q = v * S = \sqrt{(2 * g * h)} * S * \rho_l$$

$$S = \frac{Q}{\sqrt{(2 * g * h)} * \rho_l} = \frac{2000}{\sqrt{(2 * 9,81 * 60)} * 6,9} \cong 8,4 \text{ cm}^2 \quad (29)$$

- kde: Q – průtok taveniny [$\text{kg} * \text{s}^{-1}$],
 m_{odlitek} – hmotnost odlitku [kg],
 t – doba plnění odlitku [s],
 v – rychlost proudění v daném bodě [$\text{m} * \text{s}^{-1}$],
 S – celková plocha zářezů [cm^2],
 g – gravitační konstanta [$\text{m} * \text{s}^{-2}$],
 h – metalostatická výška [cm],
 $\rho_{\text{litina-l}}$ – hustota litiny v tekutém stavu [$\text{kg} * \text{m}^{-3}$].

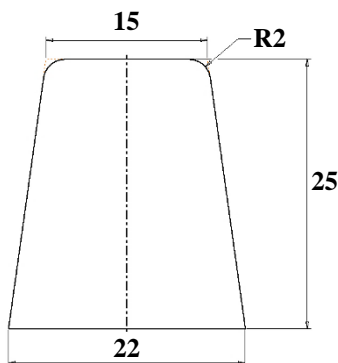
Rozdělením mezi čtyři zářezy vznikla výsledná požadovaná plocha zářezu o velikosti přibližně $2,1 \text{ cm}^2$. Zářezy byly zvoleny lichoběžníkového tvaru (Obr. 56).



Obr. 56 Návrh průřezu zářezu.

Návrh struskového kanálu

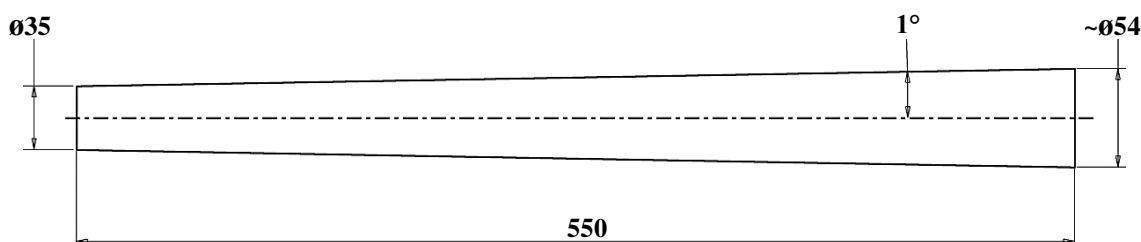
Struskový kanál byl navržen, jak bylo zmíněno výše, v poměru 1:1,1 k zářezům. Pokud je skutečná celková plocha zářezů $8,4 \text{ cm}^2$, musí být tedy celková plocha struskového kanálu přibližně $9,24 \text{ cm}^2$. Jelikož je forma rozdělena na dvě poloviny, bylo třeba plochu struskového kanálu navrhnout poloviční, tj. cca $4,62 \text{ cm}^2$.



Obr. 57 Nákres průřezu struskového kanálu.

Návrh licího kúlu

Spodní průřez licího kúlu by měl splňovat poměr 1,15:1 k zářezům. Po vypočtení by tedy jeho plocha měla být přibližně 9,66 cm². Přepočtením na průměr je získána hodnota 35 mm. Samotný kúl byl navržen s výškou 550 mm, jelikož byla jeho výška prodloužena o výšku zářezů. Vymodelován byl s rozšířením 1°.

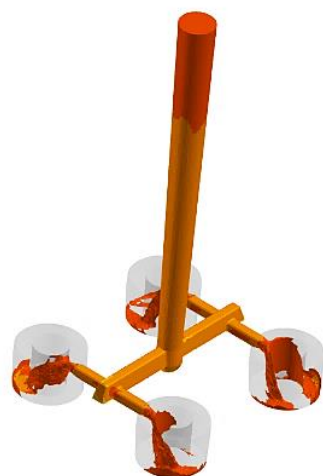
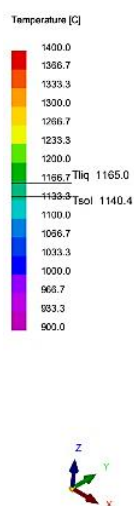


Obr. 58 Nákres vtokového kúlu.

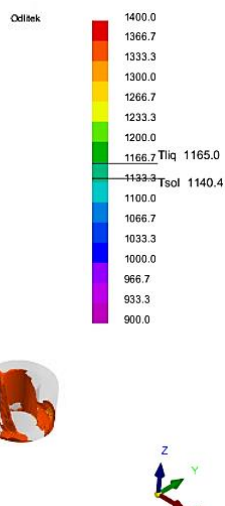
Kontrola správnosti návrhu vtokové soustavy simulací

Pro navrženou vtokovou soustavu a odlitky byla provedena simulace v programu ProCast. Cílem simulace byla kontrola doby plnění formy pro potvrzení správnosti návrhu vtokové soustavy. Ostatní údaje, které simulace obsahovala, nebyly pro průběh experimentu podstatné a simulace na jejich přesnou kontrolu nebyla nastavena. Proto jim není věnována pozornost.

Čas plnění formy byl ze simulace stanoven na přibližně 4 sekundy. To je o něco méně, než na co byla vtoková soustava původně počítána (přibližně 6 s – rovnice (28)). Simulovaná hodnota je ale dostatečná vzhledem k simulaci z MAT Ueckermünde, kde je čas plnění přibližně 5 s (Obr. 50). Nutno je ovšem zmínit, že ruční lití, použité při pozdějším experimentu, není schopné zajistit potřebný průtok, a proto bude doba plnění pravděpodobně o něco delší.



Obr. 59 Fotografie z průběhu simulace plnění.



Obr. 60 Stav plnění odlitku v čase ~3,5 s od začátku lití.

4.1.2 Výroba jaderníku a zkušebních jader

Po navržení tvaru zkušebního jádra bylo potřeba tato jádra vyrobit. Jádrou směs typu cold-box bylo potřeba vstřelit a pomocí katalyzátoru urychlit její vytvrzení.

Celý proces výroby se sestával ze dvou fází. První fází výroby byl návrh a výroba jaderníku, potřebného pro výrobu zkušebních jader. Ve druhé fázi pokračovala výroba vlastních zkušebních jader pomocí vstřelovacího zařízení.

Návrh a výroba jaderníku

Jaderník bylo potřeba navrhnout s ohledem na malý počet vyrobených jader. To znamená především tak, aby byla jeho výroba co nejjednodušší. Vlastní jaderník byl tedy navržen ze dřeva a tvarem pouze pro jádro o tvaru válce. Je tvořen ze tří dílů – dvou stran a spodního dílu, tvořícího dno. Dno obsahuje sítko, které zajišťuje dostatečný odvod vzduchu při vstřelu. Jednotlivé díly jsou k sobě spasovány pomocí čepů (Obr. 61). Výroba dřevěného těla jaderníku byla provedena v dřevomodelárně odboru slévárenství Ing. Radimem Jelínkem.



Obr. 61 Rozebraná dřevěná část jaderníku.



Obr. 62 Složený jaderník.

Pro vrchní známku byla dodatečně vytisknuta vložka na 3D tiskárně z materiálu PLA, zajišťující odformování zkosení (Obr. 63). Na spodní známce se však nalézá zkosení pouhých $1,5^\circ$ a to pouze kvůli úkosu použitému na modelovém zařízení (pro usnadnění vyjímání modelu po odformování). Na to, aby mohl být aplikován stejný způsob jako u horní známky a mohla být vytištěna vložka, byl tento úkos již příliš malý. Proto byl dodatečně vytisknut přípravek s požadovaným zkosením. Pomocí tohoto přípravku byla spodní půlka válcových jader třením na požadované zkosení obroušena (Obr. 64).



Obr. 63 Vložka do jaderníku pro odformování vrchní známky.



Obr. 64 Přípravek pro vybroušení úkosu spodní známky jádra.

Výroba jader

Jádra bylo potřeba vyrobit ze směsi PU cold-box odpovídající technologii, která je používána v MAT Ueckermünde. Jako pojivo byla zvolena pryskyřice Sigmacure, dodaná společností Hüttenes-Albertus. Pryskyřice se skládá ze dvou složek. Složku 1 tvoří fenolová pryskyřice Sigmacure 9613, složku 2 polyisokyanát Sigmacure 8450. Rychlého vytvrzení v jaderníku bylo dosaženo pomocí profouknutí terciárním aminem DMPA.

Poměr dávkování obou složek byl zvolen 0,55/0,55. Do mísiče s ostřivem byla nejdříve dána složka 2 a směs byla mísená po dobu jedné minuty. Následně byla přidána složka 1 a probíhalo další mísení po dobu další minuty. Po uplynutí doby, potřebné pro mísení byla směs odebrána a postupně vstřelena do jaderníku. Katalyzace probíhala po dobu 20 s pomocí 0,5 ml terciárního aminu.



Obr. 65 Mísič používaný při experimentu. Vpravo vnitřní část mísiče s lopatkami.

Obr. 66 Vstřelovací zařízení použité při experimentu.

Výroba jader probíhala nezávisle v laboratoři společnosti ASK v Brně. Mísení probíhalo v malém lopatkovém mísiči Vogel & Schemmann (Obr. 65). Použitým vstřelovacím zařízením byl stroj Hansberg H1 (Obr. 66).



Obr. 67 Vyrobené zkušební jádro před aplikací nátěru.

Celkem bylo vyrobeno okolo třiceti zkušebních jader. Kusy navíc byly uskladněny jako rezerva pro případ, že by byla potřeba experiment z nějakého důvodu opakovat. Jádra byla před založením opatřena testovanými nátěry, viz podkapitola 4.2.

4.1.3 Výroba modelu a forem

Při výrobě modelu bylo přihlíženo k malému počtu vyráběných forem, a proto bylo využito méně finančně náročných alternativních způsobů výroby modelu. U výroby forem byla hlavním problémem formovací směs pro jejich výrobu a potřeba vyřešit zaformování vtokového kůlu pro požadovanou metalostatickou výšku.

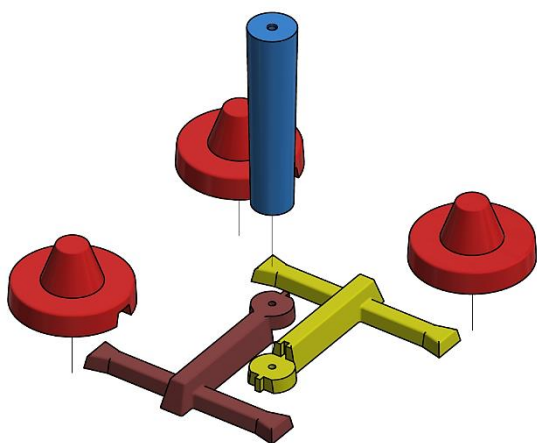
Výroba modelového zařízení

Vzhledem k malému množství forem v řádech kusů by bylo neekonomickým řešením vyrábět modelové zařízení běžným způsobem, tj. ze dřeva obráběním. Proto bylo k výrobě modelového zařízení využito technologie 3D tisku. Tato technologie umožňuje poměrně snadnou přípravu v 3D modelovacích programech a zároveň poměrně rychlé změny na modelu při velmi nízkých nákladech. Toho bylo využito při optimalizaci modelu. Zároveň bylo možno digitálních návrhů 3D modelu využít pro simulaci plnění vtokové soustavy (Obr. 59).

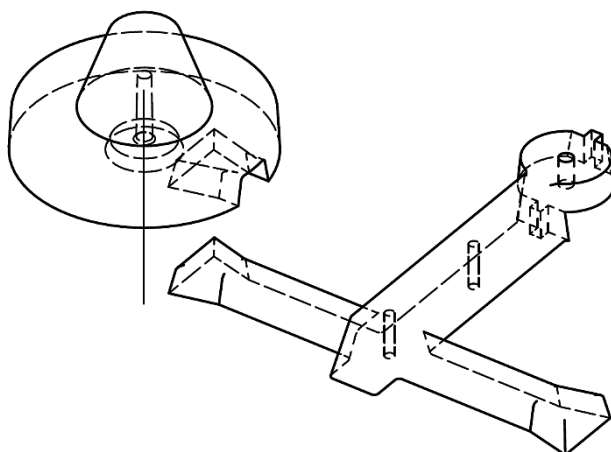
• Návrh modelového zařízení

Vtoková soustava a modely byly modelovány v programu Inventor.

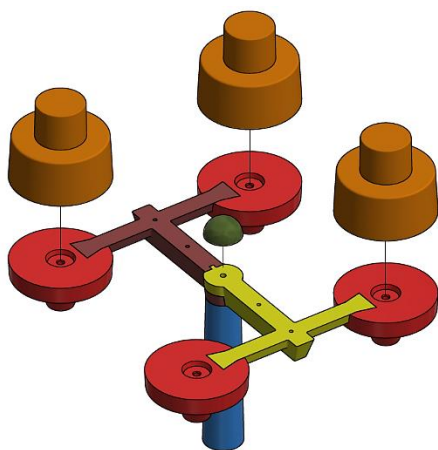
Z navržené vtokové soustavy byly nejprve izolovány jednotlivé díly, a to: odlitky, vtokové kanály, dopadová jamka a vtokový kůl. Odlitky byly dále rozděleny na vrchní a spodní část – pro zaformování vrchu a spodku formy. Rozdělen byl i vtokový kůl, a to na spodní část (o výšce rámu formy) a vrchní část, která byla později formována zvlášť. Ke spojení jednotlivých dílů modelu vtokové soustavy bylo využito čepů (vtokový kůl, dopadová jamka), tvarových výstupků (odlitek – Obr. 69), případně jejich kombinace (rozdávěcí kanály – Obr. 68). Zakomponovány byly také závitové otvory pro usnadnění vyjímání modelů z forem za pomoci reverzního kladívka (Obr. 69, Obr. 71).



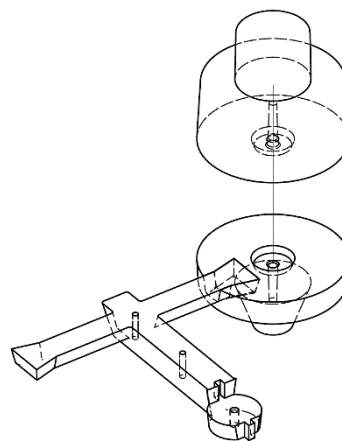
Obr. 68 Nákres sestavení modelu pro zaformování vrchní poloviny formy.



Obr. 69 Detail tvarového spoje vrchní části modelu odlitku s rozváděcím kanálem.



Obr. 70 Nákres sestavení modelu pro zaformování spodní poloviny formy.



Obr. 71 Detail tvarového spoje spodní části modelu odlitku s vrchní částí.

• Výroba modelového zařízení

Většina částí modelu byla zhotovena pomocí 3D tisku. Výjimku tvořily díly vtokového kůlu, které by vzhledem k jejich rozměrům bylo časově náročné a neekonomické tisknout. Proto byly zhotoveny ze dřeva soustružením. To jim také dodalo vyšší pevnost, která byla vzhledem k jejich velikosti žádoucí. Vymodelované díly byly pro 3D tisk připraveny v programu Prusa Slicer a následně vytištěny na 3D tiskárně Prusa MK3S z materiálu PLA. V rámci optimalizace

bylo nutno po prvním tisku model upravit. Důvodem bylo problematické vyjímání z forem kvůli příliš malým úkosům a nevhodně umístěným závitovým otvorům pro reverzní kladívka.

Po vytisknutí byly jednotlivé díly pro zjemnění povrchu obroušeny smirkovým papírem a následně nasprejovány akrylátovým sprejem pro další vyhlazení. Nakonec byly modely natřeny parafinovým separátorem pro zajištění bezproblémového vyjímání z formovací směsi.



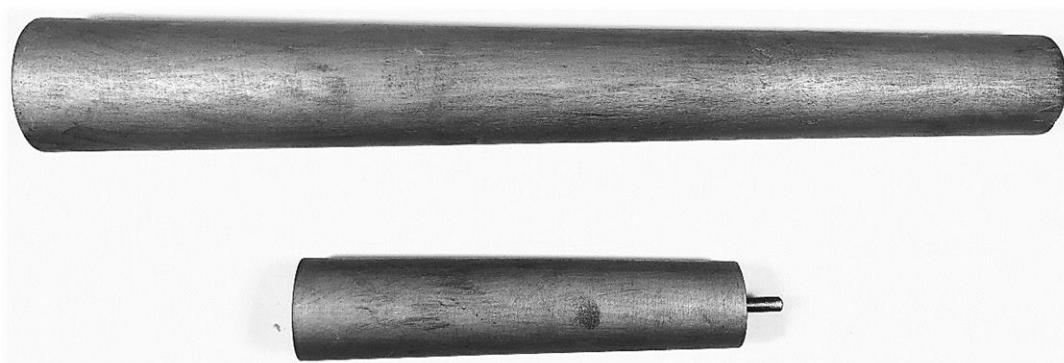
Obr. 72 Vytisknutá a natřená část modelu pro testovací odlitek. Vlevo vrchní a uprostřed spodní část modelu. Vpravo obě poloviny v pohledu zespod (spodní část nahoře).



Obr. 73 Rozváděcí kanály a vtokový kůl s dopadovou jamkou.



Obr. 74 Sestavená vtoková soustava s odlitky (bez dopadové jamky).



Obr. 75 Díly vtokového kůlu. Nahoře část zaformovaná zvlášť mimo formu. Dole část k zaformování do vrchní poloviny formy.

Návrh a výroba forem

Při výrobě forem byla nejproblematictější volba formovací směsi, jak je detailně rozebráno dále. Přestože se experiment týká jader zhotovených technologií cold-box, může mít forma na problematiku vzniku vad typu připečeniny vliv (viz předchozí kapitoly). Dalším technologickým problémem pak bylo zaformování velké výšky vtokového kúlu a metalostatický vztlak, působící na vrchní polovinu formy.

• Volba formovací směsi

V rámci experimentu na Odboru slévárenství FSI VUT Brno nebylo možné replikovat bentonitové formy, odpovídající linkám DISA, a to ze dvou důvodů.

První překážkou byla nutnost použití ručního pýchování bentonitové směsi namísto strojního. Ruční pýchování by bylo nevyhnutelné vzhledem k nedostupnosti zařízení, které by umožňovalo jakoukoli formu strojního pýchování. Problematickou by byla i konstrukce modelu, který byl zhotoven 3D tiskem, jelikož by takto zhotovený model pravděpodobně nebyl pro strojní pýchování dostatečně pevný. V případě využití ručního pýchování by však takto vyrobené formy nemohly dosahovat spýchování na úrovni forem v MAT Ueckermünde. To by mohlo následně způsobovat havárie formy při vysokých metalostatických tlacích.

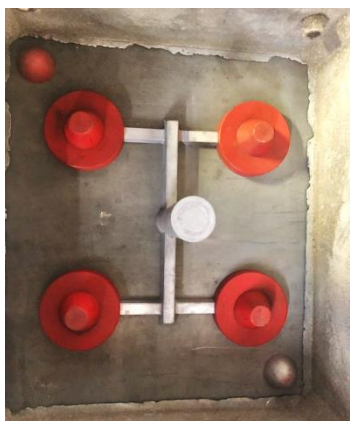
Druhou překážkou byla prodleva mezi zaformováním forem a odléváním. Samotnou výrobu a přípravu forem by při ručním pýchování s navrženým modelem nebylo možno provést dostatečně rychle. Vzhledem k vytíženosti fakultní slévárny by také bylo obtížné naplánovat celý proces výroby tak, aby mezi přípravou forem a tavnou (společně s přípravou vsázky) byla prodleva co nejkratší. Delší prodleva by totiž mohla zapříčinit obeschnutí forem a ztrátu vlastností směsi, což by mohlo vést k poškození formy. Rozdílné doby mezi zaformováním a litím by pro jednotlivé formy také mohly způsobit rozdílné podmínky ve formě, což by mohlo ovlivnit srovnatelnost jednotlivých odlitků.

Z výše uvedených důvodů bylo přistoupeno k nahrazení bentonitové formovací směsi ST směsí s pojivem Geopol. Použitím této směsi však forma nemá některé vlastnosti bentonitových směsí, které ovlivňují mechanismy penetrací. Především ve směsi není oproti bentonitům přítomno větší množství vody. Kvůli tomu bude forma odvádět méně tepla, než se odvede v první chvíli vlivem odpaření vody u bentonitu. Vodní pára navíc také může podporovat oxidační atmosféru formy. Na druhou stranu neobsahuje ST směs uhlikaté přísady, které u bentonitu zabezpečují redukční atmosféru. Tento faktor je daleko podstatnější než faktor tepelné akumulace a vodivosti formy.

K nasimulování uhlikatých přísad v bentonitových formách bylo použito natření forem uhlikatým nátěrem. Ten by měl zabezpečit redukční atmosféru formy a tím navodit podobné podmínky, jako ve formách z bentonitu.

• Výroba forem

Formy byly zhotoveny do rámců o rozměrech 485×420×185 mm. Nejprve byla zaformována vrchní polovina formy s rozváděcími kanály (Obr. 76). Poté byl rám otočen a na zaformovaný model byla nasazena dopadová jamka a spodní polovina modelů odlitků (Obr. 77). Zajištění rámu proti posunutí bylo mimo zaváděcí kolíky zabezpečeno pomocí francouzských jader.



Obr. 76 Zaformování vrchní poloviny formy.



Obr. 77 Zaformování spodní poloviny formy (na obrázku chybí dopadová jamka).

Po zaformování (Obr. 78) byly z formy vytaženy díly modelu za pomoci reverzních kladívek a dutiny pro odlitky byly označeny na bocích pomocí drážek, aby později nedošlo k záměně jednotlivých odlitků. Následně byly formy natřeny uhlíkatým nátěrem na lihové bázi. Pro jeho rychlejší zavadnutí byl po nanesení zapálen (Obr. 79).



Obr. 78 Zaformovaný model.



Obr. 79 Zapálený uhlíkatý nátěr.

Vrchní část vtokového kúlu byla zaformována zvlášť do ocelové trubky (Obr. 80 vlevo). Takto zhotovená forma pro kúlu byla také natřena uhlíkatým nátěrem.

Celkově byly vyrobeny tři formy. Do známek byla umístěna jádra a po zdokumentování jejich polohy byly formy složeny. Zajištěny byly pomocí šroubů a úkladků. Zvlášť zaformované vtokové kúly byly k formám přilepeny pomocí žáruvzdorného tmelu a obsypány pískem. Na jejich vrch byly nakonec přilepeny ještě vtokové jamky pro usnadnění lití.



Obr. 80 Vtokový kůl připravený k zaformování (vlevo) a vtoková jamka, natřená zirkonovým nátěrem (vpravo).



Obr. 81 Založená jádra ve formě.



Obr. 82 Složené a zatížené formy, připravené na licím poli k odlití.

4.2 Průběh experimentálních zkoušek

Experimentální zkoušky byly rozděleny na laboratorní test nátěrů a jejich vlastností a na praktickou zkoušku zapékání jader ve formě s podmínkami, navozujícími použití jader v provozu MAT Ueckermünde.

4.2.1 Laboratorní test nátěrů

V rámci laboratorního testu nátěrů byly zkoumány především jejich aplikační vlastnosti a prodyšnost. Nátěry byly také dodatečně zkoumány ve zvětšení na stereolupě. Zde byla zkoumána především přibližná hloubka jejich prostupu do jádrové směsi, schopnost pokrytí a souvislost nátěrové vrstvy, případně její vady. Data ze zkoušek lze později přiřadit k výsledkům praktické zkoušky zapékání jader.

Zkouška aplikace nátěrů

Všechny nátěry byly nejprve důkladně rozmíchány a poté byla změřena jejich hustota a hodnota Baumé v koncentrovaném stavu. Následně byly postupně naředěny na tři hodnoty Baumé (Obr. 85). První ředění bylo provedeno na hodnotu 25 Bé, která je dle doporučení výrobců používána v provozu MAT Ueckermünde. V rámci experimentu byly pro další dvě ředění voleny nižší hustoty, a to na hodnoty 22 Bé a 18 Bé. Při každém ředění byla zároveň změřena měrná hmotnost (pomocí odměrného válce a váhy) a hodnota průtoku normovaným Fordovým pohárkem s certifikovaným průměrem 4 mm (Obr. 86). Jednotlivé hodnoty měření shrnuje Tabulka 9. Cílem těchto ředění bylo zjistit možnost aplikace více ředěných nátěrů a jejich následnou účinnost při experimentu zapékání jader.



Obr. 83 Pomůcky použité při testování nátěrů. Zleva: Fordův pohárek, měřič Baumé a měřič tloušťky nátěru.

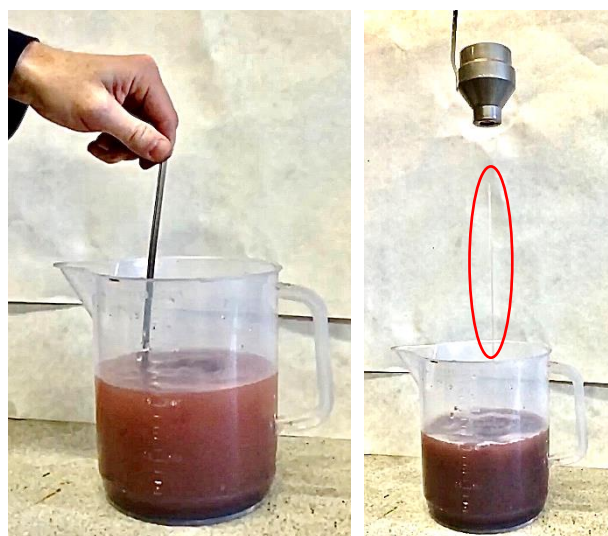


Obr. 84 Jádra v průběhu máčení.

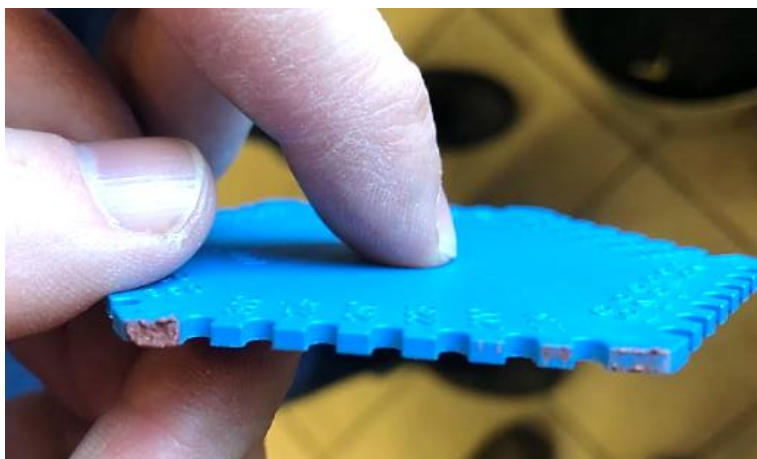
Aplikace nátěru probíhala máčením. Máčena byla jádra a vzorky na pozdější zkoušky prodyšnosti nátěrů. Aplikace probíhala ponořením po dobu tří sekund a následným okapáním a ponecháním k zavadnutí. Po zavadnutí a získání matného vzhledu byla změřena tloušťka nátěru pomocí certifikované měřky (Obr. 87).



Obr. 85 Měření hodnoty Baumé.



Obr. 86 Měření Fordovým pohárkem. Vlevo začátek měření, vpravo konec (označen dopadající proud tekutiny).



Obr. 87 Měření tloušťky nátěru pomocí certifikované stěrky.

Zkouška prodyšnosti

Zkouška probíhala na seřízeném stroji Georg Fisher +GF+ (Obr. 88 vlevo). Principem funkce je tlak vodního sloupce, který tlačí na píst se vzduchem. Vzduch, poháněný tímto pístem, prochází přes utěsněný normováleček o rozměrech $\varnothing 50 \times 50$ mm (Obr. 89). Těsnění normoválečku je řešeno gumovou membránou, která se po vložení vzorku nafoukne za pomoci pumpy a tím utěsní boky vzorku (Obr. 88 vpravo). Díky tomu je vzduch nucen procházet celým objemem vzorku, přičemž je průtok vzduchu měřen a po ustálení je možné jej odečíst z ciferníku přístroje. Na přístroji se nachází dvě měřící stupnice, mezi kterými je možno přepínat v závislosti na měřeném průtoku (Obr. 88 uprostřed). Měření je pouze orientační a poměrové, jelikož je ovlivňováno velkým množstvím náhodných faktorů a absolutní hodnoty nejsou v tomto případě stěžejní.

V rámci měření prodyšnosti byly měřeny vždy tři shodné vzorky k zajištění kontroly a možného vyloučení případných vadných vzorků.



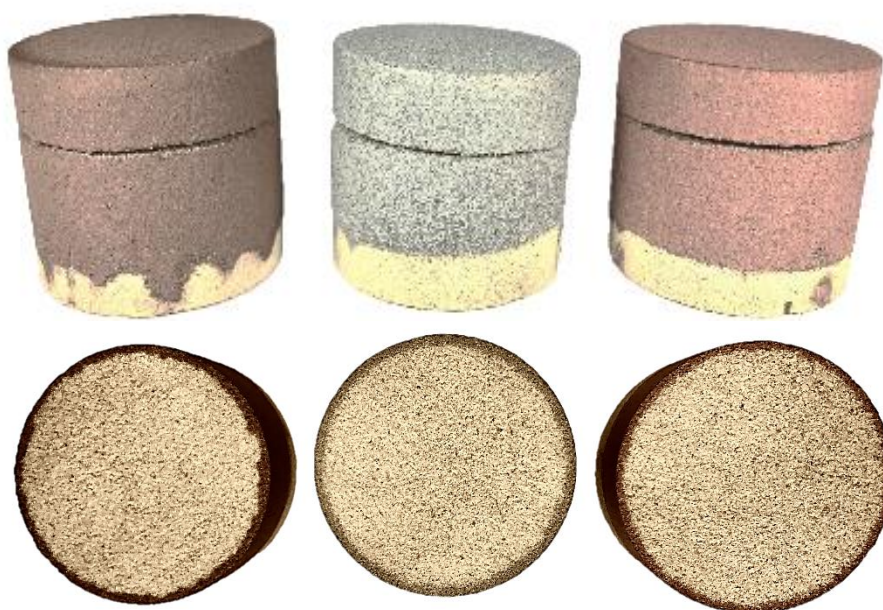
Obr. 88 Přístroj na měření prodyšnosti. Uprostřed nahoře stupnice prodyšnosti, dole přepínač průtočnosti. Vpravo přípravek na umístění vzorku.



Obr. 89 Jedna sada vzorků (ze tří) k měření prodyšnosti. V sadě jsou pro každý nátěr válečky s třemi hustotami.

Analýza nátěrů pod stereolupou

Po měření prodyšnosti následovala analýza nátěrů v metalografické laboratoři. Ke zkoumání byla použita stereolupa firmy Intraco Micro s.r.o. Fotografie jsou pořízeny s přibližným zvětšením přibližně 50 a 90. Z fotografií nelze přesně určit tloušťku nátěru na povrchu vzorku, protože většinou není nátěr na jeho okraji dostatečně zachován. To je způsobeno především druhem povrchu, který neumožňuje dostatečně jemné přeříznutí vzorku. I přesto lze z fotografií získat představu o tom, jak hluboko do materiálu nátěr prostupuje i přibližnou představu o tloušťce a kompaktnosti vrstvy nátěru na povrchu. Fotografie všech rozříznutých vzorků v zvětšeném i nezvětšeném stavu obsahuje Příloha 4.



Obr. 90 Rozříznuté normoválčky pro zkoumání nátěru pod stereolupou. Zleva: nátěr č. 1, č. 2 a č. 3 (naředění 22 Bé).

Výsledky laboratorních testů nátěrů

Výsledky jednotlivých měření vlastností nátěrů shrnuje Tabulka 9 a graficky jsou vyjádřeny na Obr. 91. V rámci testování byly pozorovány i aplikační vlastnosti a chování nátěrů. Tyto poznatky jsou popsány níže, nicméně jde o subjektivní pozorování, a tak je s nimi nutno pracovat. Nátěry byly nanášeny na vzorky s ostřivem GL 21.

Nátěr č. 1 měl tendenci k tvorbě hrudek, nicméně jemnějších, než v případě nátěru č. 2. Disponoval velmi krátkou dobou zavadnutí na matný vzhled, a to i při vyšších naředěních. Také byl velmi málo viskózní, což umožňovalo dobré okapání přebytečného nátěru ze vzorku. Nátěr měl ze zkoumaných největší tendenci k napěnění při míchání. Na vzorku prostupoval do hloubky směsi největší počet částic (prostoupení od ~ 1,5-2 mm). Na povrchu tvořil nejméně kompaktní vrstvu.

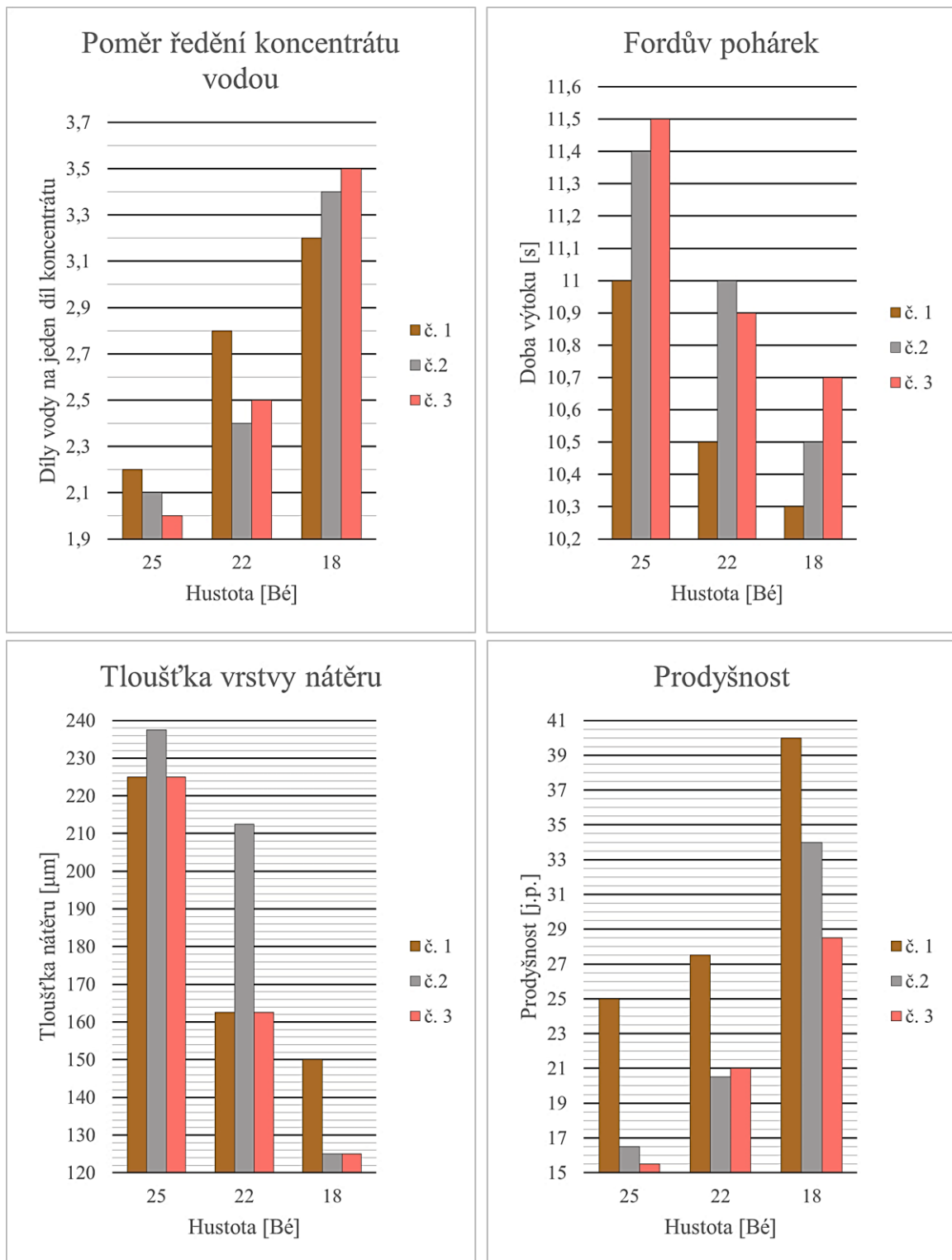
Nátěr č. 2 obsahoval větší podíl hrubších a těžších částic než zbylé nátěry. Nátěr měl ze vzorků největší tendenci k tvorbě těžko rozmíchatelných hrudek. Také měl nejdélší dobu zavadnutí na matný vzhled, obzvláště při větších naředěních. Tvořil silnou a kompaktní vrstvu, zvláště při 25 Bé, kde byly jeho aplikační vlastnosti dobré. Při nižších hustotách (22 a 18 Bé) tvořil na povrchu jader vrstvu o nekonstantní tloušťce, která se ve směru stékání nátěru podstatně

zvyšovala (těžší částice v nátěru stékaly do nižší části vzorku). Ze všech nátěrů prostupoval do jádrové směsi nejmenší počet pevných částic (zůstávaly spíše na povrchu). Prostupující částice však prostupovaly do největší hloubky směsi (prostoupení ~ 1,3-2,5 mm). Na povrchu vzorku tvořil krustu.

Nátěr č. 3 byl z testovaných vzorků nejlépe rozmíchatelný a měl nejmenší tendenci k tvorbě hrudek plniva. Doba jeho zavadnutí na matný vzhled byla v kontextu dalších vzorků průměrná. Nátěr tvořil relativně souvislou vrstvu i při nižších hustotách a měl malou tendenci k napěnění při míchání. Do hloubky vzorku určité množství částic prostupovalo, ale bylo poměrně malé (prostoupení 1,3-2 mm). Kompaktností povrchové vrstvy tvořil průměr mezi výše zmíněnými nátěry.

Tabulka 9 Shrnutí laboratorních zkoušek nátěrů.

Nátěr	Ředění/ Ostřívo	Poměr naředění vodou	Měrná hmotnost [g*cm ⁻³]	Fordův pohárek [s]	Tloušťka nátěru [μm]	Prodyšnost [j. p.]
Bez nátěru	GL 27					130
	GL 21					105
Nátěr č. 1	86 Bé	koncentrát	1420			
	25 Bé	1:2,2	1190	11,0	225	25
	22 Bé	1:2,8	1150	10,5	150-175	27,5
	18 Bé	1:3,2	1130	10,3	150	40
Nátěr č. 2	87 Bé	koncentrát	1340			
	25 Bé	1:2,1	1160	11,4	225-250	16,5
	22 Bé	1:2,4	1140	11	200-225	20,5
	18 Bé	1:3,4	1100	10,5	100-150	34
Nátěr č. 3	88 Bé	koncentrát	1415			
	25 Bé	1:2	1210	11,5	225	15,5
	22 Bé	1:2,5	1165	10,9	150-175	21
	18 Bé	1:3,5	1120	10,7	125	28,5



Obr. 91 Grafy znázorňující údaje z tabulky 9. Na grafu prodyšnosti nejsou zobrazeny hodnoty pro nenatřená jádra. Důvodem je příliš velký rozdíl hodnot.

Při zkouškách prodyšnosti byly nalezeny určité vzorky, jejichž hodnoty prodyšnosti byly od dalších dvou hodnot vzdáleny natolik, že musely být vyřazeny jako neshodné. Tyto vzorky byly dále zkoumány pod stereolupou, aby bylo zjištěno, jestli se jedná o vadu nátěru, či vzorku. Většinou se jednalo čistě o mechanické vady vzorků jako odřeniny, rýhy atp. (Obr. 93, Obr. 94, Obr. 92 vlevo). V případě nátěru č. 1 byly ovšem na neshodných vzorcích nalezeny i jemné bublinky, které po prasknutí zanechaly na povrchu důlky s tenčí vrstvou nátěru

(Obr. 92 vpravo). Je možné, že byly bublinky způsobeny špatnou aplikací, nicméně mohou být dalším důvodem abnormálně zvýšené prodyšnosti daných vzorků.



Obr. 92 Nátěr č. 1 - vlevo vada vzorku, vpravo bublinky.

Obr. 93 Nátěr č. 2 - vada vzorku.

Obr. 94 Nátěr č. 3 - vada vzorku.

4.2.2 Test vlivu změny jádrového ostřiva na JBS

Tento jednoduchý test měl za cíl zjistit úsporu dávkování kompenzačního ostřiva GL 16 do JBS vlivem změny ostřiva z GL 27 na GL 21. Kompenzační ostřivo má v tomto případě za cíl kompenzovat hrubozrnější ostřivo, vstupující do směsi z jader, aby byla zachována potřebná zrnitost JBS pro prevenci penetrací, viz. podkapitola 3.4.

Požadovaná zrnitost výsledné směsi by měla být dle údajů MAT Ueckermünde d_{50} 0,20-0,21 (Obr. 45) a AFS 70-71, s podílem jemných částic $<0,125$ mm v minimálních hodnotách 10%.

Tabulka 10 Granulometrický rozbor, provedený na FSI VUT.

-> [%]	>1	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,125	0,1	0,08	0,063	<0,125
GL 16	0	0	0,3	0,8	19,8	20,8	34,4	15,8	7,6	0,5	23,9
GL 21	0	0	1	3,5	45,2	28,8	16,6	3,5	1,3	0,1	4,9
GL 27	0	0,2	2,7	10,1	56,9	19,6	8,1	1,3	0,9	0,2	2,4

Tabulka 11 Granulometrický rozbor dle dodavatele.

-> [%]	0,8	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,100	0,071	0,056	0,02	<0,125
GL 16	0	0	0,27	0,86	19,77	20,82	34,4	15,8	7,64	0,46	
GL 21	0	0	1,1	5,8	51,8	23,2	17	1	0	0	
GL 27	0	0,1	3,7	16,2	62,0	12,8	5	0,2	0	0	

Mísící poměr pro dosažení požadovaných vlastností je v případě ostřiva GL 27 v MAT Ueckermünde volen 50:50 s GL 16.

V případě použití ostřiva GL 21 by bylo pro dosažení částic <0,125 mm potřeba mísení pouze cca 75:25 až 70:30 s GL 16. Tato hodnota byla stanovena jednak výpočtem za pomoci směšovací rovnice, jednak experimentem, při kterém byly smíseny dané poměry obou ostřiv.

V obou případech by d_{50} nabývalo hodnoty mezi 0,18-0,19 mm a podíl částic <0,125 mm by varioval okolo 10 % $\pm 0,5$ %. Parametr AFS nebylo možno spočítat, jelikož byly rozборы prováděny na sítích ISO, pro které nefunguje výpočtová rovnice AFS.

4.2.3 Praktická zkouška zapékání jader

V rámci zkoušky připečenin byly ve formě s podmínkami linky Disamatic 250-C odlity zkušební odlitky. Z nich byly následně připraveny vzorky, které byly dále zkoumány především z hlediska kvality struktury povrchu a výskytu vad typu připečeniny.

Umístění jader ve formách

Aby mohly být získány požadované zkušební odlitky, ke zkoumání vlivu nátěrů a ostřiva na odolnost proti vzniku připečenin, bylo nutno jádra založit do forem (viz podkapitola *Výroba modelu a forem*). Umístění jader bylo zvoleno tak, aby byly vždy v jedné formě tři vzorky nátěrů o stejné aplikační hustotě a jeden vzorek bez nátěru.

Do první formy byla umístěna jádra s nátěry s nejvyšším naředěním (18 Bé) a beznátěrové jádro s ostřivem GL 27. Tato varianta byla zvolena proto, že v první formě jsou při lití nejméně příznivé podmínky z důvodu vysoké teploty taveniny. Proto je vhodné do této formy umístit vzorky, u kterých se předpokládá nejmenší odolnost – podle výsledků pak lze možnost jejich aplikace buď s jistotou zamítnout, nebo potvrdit.

Do druhé formy byla umístěna jádra s nátěry naředěnými na hodnotu 22 Bé a jádro s ostřivem GL 21. Do poslední formy pak jádra s nátěry s nejvyšší aplikační hustotou (25 Bé) a opět jádro s ostřivem GL 21.

Tabulka 12 Grafické znázornění umístění jader do forem

Forma	Pozice 0	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3
Forma č. 1 (nátěry 18 Bé)	GL 27			
Forma č. 2 (nátěry 22 Bé)	GL 21	nátěr č. 1	nátěr č. 2	nátěr č. 3
Forma č. 3 (nátěry 25 Bé)				

Tavba, odlévání a příprava vzorků

Tavby byly provedeny dvě, protože první provedení experimentu nebylo úspěšné. Při prvním experimentu byly formy odvdušněny pomocí výfuků, na jejichž ústí byly položeny úkladky k jejich zchlazení. Zchlazení ale neproběhlo dostatečně a formy skrze výfuky vytekly, takže

nemohlo být dosaženo požadovaného metalostatického tlaku sloupce vtokového kůlu. Podruhé byl problém vyřešen zaslepením výfuků.

Při druhé tavně bylo použito složení kovu odpovídající přibližně litině s kuličkovým grafitem EN-GJS-500-7 s vyšším obsahem Mn, dle specifik slévárny MAT Ueckermünde (Tabulka 4). Lící teplota byla v rozmezí ~1415 °C při začátku lití (první forma) a přibližně 1395 °C při konci lití (třetí forma). Celková doba mezi měřeními na začátku a na konci lití byla cca 70 s. Doba plnění jedné formy byla cca 5 s.



Obr. 95 Fotografie z průběhu lití.

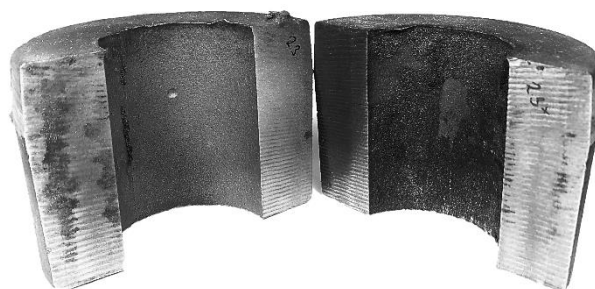


Obr. 96 Surový odlitek po vyjmutí z formy.

Po odlití a ochlazení byly odlitky vyjmuty z forem. Následně byly odřezány vtokové soustavy a odlitky byly zvnějšku otryskány pískem. Následovalo rozřezání odlitků pomocí pásové pily na dvě poloviny (Obr. 97). Řezy byly vedeny přes zářezy, aby mohla být zkoumána každá polovina odlitku zvlášť nezávisle na druhé. Jedna z polovin byla ponechána v surovém stavu po vytažení z formy, druhá polovina byla otryskána na pneumatickém pískovém tryskači (Obr. 98). Díky tomu lze porovnávat povrch odlitku v surovém stavu a po otryskání, při kterém jsou odstraněny méně významné vady.



Obr. 97 Příprava vzorků – dělení odlitku.

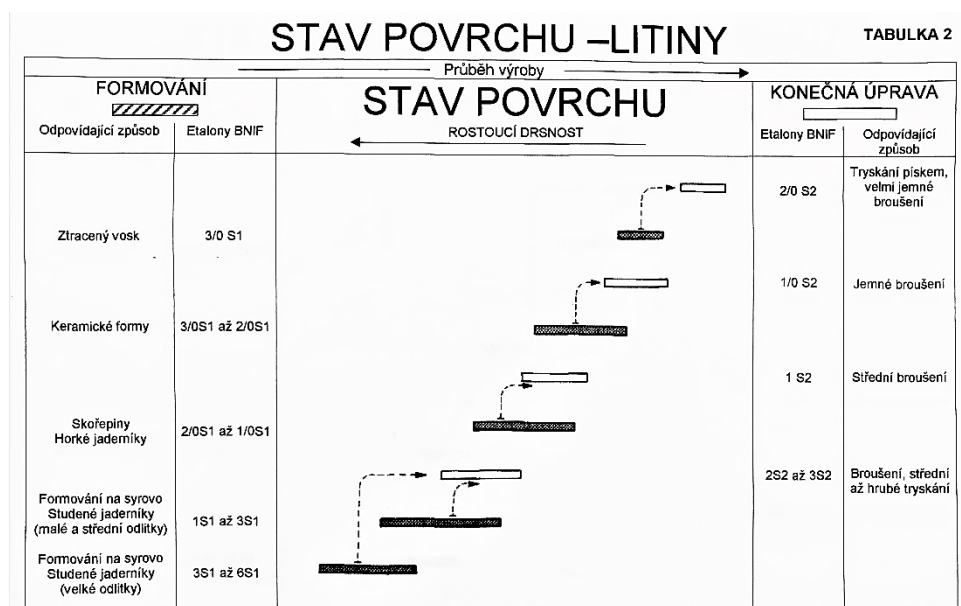


Obr. 98 Rozříznutý vzorek. Vlevo otryskána polovina, vpravo neutryskaná.

Hodnocení struktury povrchu odlitků

Zkoumán byl především povrch na spodní části odlitku. Pod stereolupou byla pozorována drsnost povrchu a případný připečený písek. Mezi vzorky byl vzájemně porovnáván jak surový povrch, tak zvláště otryskány povrch. Hledána byla nejvíce naředěná verze nátěru, zajišťující jemný povrch bez vad. Porovnání struktury povrchu (Tabulka 13) bylo provedeno také

za pomoci porovnávacích etalonů (použité etalony viz. Příloha 6), vydaných institucí Bureau de Normalisation des Industries de la Fonderie [47]. Povrch je podle těchto etalonů hodnocen vizuálně. Použité etalony jsou odstupňovány podle kvality povrchu od nejméně kvalitního: 3S1 > 2S1 > 1S1 > 1/0S1 > 2/0S1 > 3/0S1 (Obr. 99, plné rozlišení viz Příloha 5) [47].



Obr. 99 Schéma odstupňování kvality povrchu litinových odlitků dle etalonů BNIF [47].

Tabulka 13 Značení a struktura povrchu jednotlivých vzorků.

Číslo formy	Číslo nátěru	Značení v příloze	Hustota nátěru	Přibližná teplota kovu	Struktura tryskaného povrchu (BNIF)
1.	Bez – GL 27	1.0	18 Bé	~ 1415 °C	3S1 + výronky
	č. 1	1.1			1/0S1
	č. 2	1.2			2/0S2 + výronky
	č. 3	1.3			1/0S1 + výronky
2.	Bez – GL 21	2.0	22 Bé	~ 1407 °C	2S1 → 1S1 + výronky
	č. 1	2.1			2/0S1
	č. 2	2.2			2/0S1 + drobné výronky
	č. 3	2.3			2/0S1 + drobné výronky
3.	Bez – GL 21	3.0	25 Bé	~ 1400 °C	2S1 → 1S1 + výronky
	č. 1	3.1			2/0S1 → 3/0S1
	č. 2	3.2			2/0S1
	č. 3	3.3			2/0S1

V rámci zkoumání povrchů stereolupou byly zkoumány hrany a plocha povrchu na spodní části odlitku, kde byl metalostatický tlak největší. Na vzorcích s nátěrem nebyly po otryskání pískem nalezeny žádné stopy po připékání písku. Na vzorcích bez nátěru se oproti vzorkům s nátěrem nacházel velmi hrubý povrch, ve kterém bylo místy možno pozorovat přichycená zrna písku (zvláště u vzorku 1.0 s ostřivem GL 27). Vady by v těchto případech bylo snadné odstranit

pomocí tryskání ocelovými kuličkami. Příložené fotografie mohou dále sloužit pro detailní pozorování struktury povrchu daných odlitků (viz Příloha 7).

4.3 Zhodnocení experimentálních zkoušek

V této podkapitole jsou shrnuty výsledky zkoušek laboratorních i experimentálních zkoušek, popsanych v předchozí podkapitole 4.2.

4.3.1 Využití jader bez nátěru

Při testu využití jader bez nátěru bylo zjištěno, že odlitky vykazovaly hrubý povrch s velkým počtem výronků. Přesto lze konstatovat, že s výměnou ostřiva GL 27 za GL 21 došlo k významnému zlepšení kvality povrchu.

V případě ostřiva GL 27 zůstávala na některých místech zrnka ostřiva přichycena v kovové matici i po otryskání pískem. Šlo ale spíše o ojedinělé vady a v případě tryskání odlitků např. ocelovými broky by toto ostřívo nebylo těžké z povrchu odlitku odstranit.

4.3.2 Nátěr č. 1

Nátěr č. 1 dosahoval ve všech případech naředění uspokojivých povrchů. Na vzorku 1.1 (Příloha 7) jsou v neotryskaném stavu vidět jemné výronky. Na otryskaném vzorku 1.1 však již nejsou, což poukazuje na jejich snadnou odstranitelnost (bylo je možno bez problémů odstranit i pouhým přejetím rukou). Nátěr také nezanechával v surovém stavu žádné zbytky formovací směsi a zanechával po sobě uspokojivý povrch i v surovém stavu.

Při aplikaci nátěru byla jeho výhodou rychlá zasychavost. Slabším místem pak byla především jeho vyšší pěnovitost, výskyt bublinek na povrchu namočených jader a mírná tendence k tvoření hrudek. Nátěr měl také ze všech testovaných nejvyšší prodyšnost.

4.3.3 Nátěr č. 2

U nátěru č. 2 se v případě naředění na 18 Bé u odlitků projevovaly výronky, které na nich zůstávaly i po otryskání. Podobný případ nastával i u naředění na 22 Bé, nicméně zde šlo pouze o drobné vady. Uspokojivé struktury povrchu dosahoval pouze v případě naředění na 25 Bé, kdy byla struktura po otryskání na úrovni ostatních nátěrů. Při jeho použití také zůstávalo na surových odlitcích největší množství přichycené formovací směsi, a to u všech případů naředění (Příloha 7).

Při aplikaci měl nátěr č. 2 tendence k mírné sedimentaci (zvláště při vyšších naředěních) a k tvoření menších hrudek. Sedimentace se projevovala i při jeho aplikaci znatelným stékáním ke spodním částem. Doby zavaznutí byly také poměrně dlouhé. Nátěr tvořil oproti ostatním vzorkům poměrně kompaktní a pevnou vrstvu na povrchu jádra. Společně s nátěrem č. 3 měl také nejnižší hodnoty prodyšnosti.

4.3.4 Nátěr č. 3

U nátěru č. 3 se při naředění na 18 Bé projevovaly výronky, setrvávající na odlitku i po otryskání. Při naředění na 22 Bé k nim docházelo také, ovšem tak jako u nátěru č. 2 šlo spíše o kosmetické vady. V případě naředění na 25 Bé dosahoval nátěr uspokojivého povrchu. Při hustotě 18 Bé bylo na odlitcích v surovém stavu možno pozorovat větší množství přichycené formovací směsi, při vyšších hustotách tomu už tak nebylo.

Nátěr měl nejmenší tendence k tvorbě hrudek a jeho aplikace byla bezproblémová. Doba zavaznutí se nacházela přibližně mezi nátěry č. 1 a č. 2. Hodnoty prodyšnosti se pohybovaly v podobných hodnotách jako u nátěru č. 2.

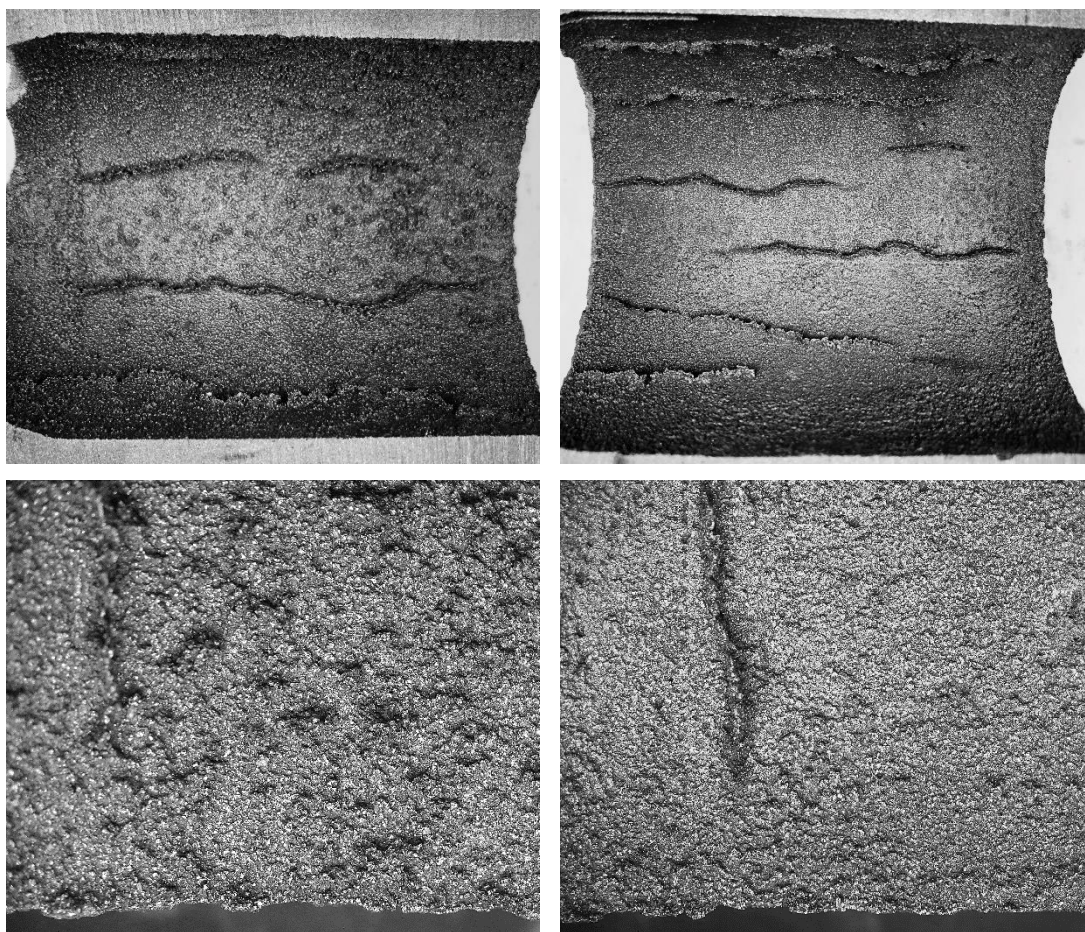
5 ZHODNOCENÍ

V této kapitole jsou souhrnně zhodnoceny výsledky jednotlivých experimentů, zpracovaných v kapitole 4 s přihlédnutím k teoretickému řešení z kapitoly 3 a rešeršní práci z kapitoly 2.

5.1 Vliv změny velikosti jádrového ostřiva na vznik připečenin

V rámci teoretické přípravy experimentu bylo zjištěno, že pouhá změna ostřiva z GL 27 na GL 21 vzniku připečenin a drsného povrchu nezabrání. Toto zjištění bylo potvrzeno praktickým experimentem (podkapitola 4.2.3). I přesto, že změna ostřiva vzniku připečenin zcela nezabrání, lze však z experimentu vyvodit, že jejich závažnost a hloubka je tímto zásahem podstatně snížena (Obr. 100).

Při aplikaci nátěru na jádra bude v případě jemnějšího ostřiva nátěr překrývat menší póry. Tím lze dosáhnout zvýšení jeho účinnosti a zlepšení výsledného povrchu odlitku.



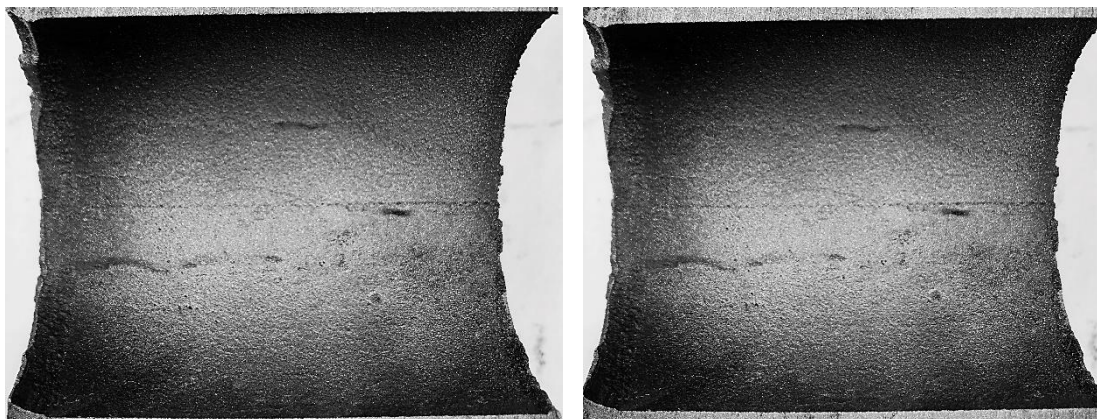
Obr. 100 Srovnání povrchu vzorku 1.0 s ostřivem GL 27 (vlevo) a 2.0 s ostřivem GL 21 (vpravo).

5.2 Zhodnocení testu nátěrů

Vyhodnocení tří nátěrů je založeno na provozní části testování (podkapitola 4.2.3) s přihlédnutím k laboratorní části testů (podkapitola 4.2.1).

5.2.1 Nátěr č. 1

Nátěr by bylo možno uspokojivě použít i při vyšším naředění, a to až na 18 Bé, kdy by bylo možno koncentrát ředit vodou až v poměru 1:3,2. Nejlepší výsledky prokazoval při hustotě 25 Bé (1:2,2), kdy se jeho struktura jediná blížila etalonu 3/OS1 BNIF.

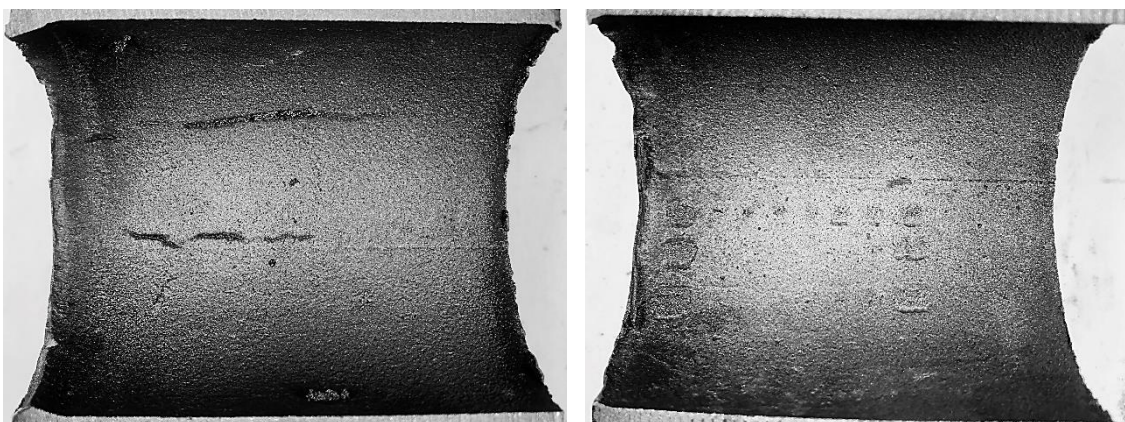


Obr. 101 Otryskané vzorky s použitím nátěru č. 1. Vlevo 1.1 (18 Bé), vpravo 3.1 (25 Bé).

5.2.2 Nátěr č. 2

Nátěr úspěšně zabraňoval tvorbě připečenin ve všech případech naředění. Při vyšších naředěních by jej však nebylo možné použít bez rizika výronků. V případě hustoty 25 Bé s naředěním v poměru 1:2,1 byla ale kvalita povrchu plně dostačující po všech stránkách. Lze zvážit i použití při 22 Bé s naředěním 1:2,4, zde by ale mohly být problémem jeho aplikační vlastnosti.

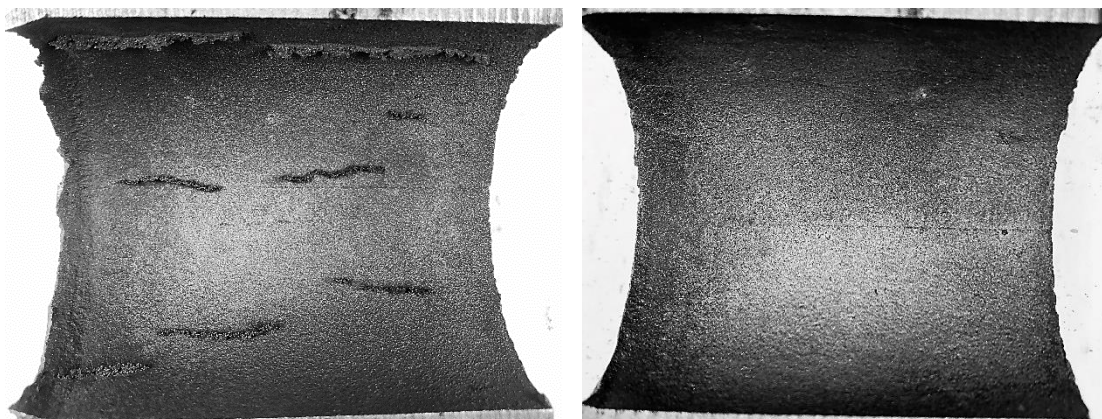
Použití tohoto nátěru by bylo vhodné především na místech, kde je potřeba nižší prodyšnost nátěru a jeho kompaktnější vrstva – např. v případě hrubšího ostříva.



Obr. 102 Otryskané vzorky s použitím nátěru č. 2. Vlevo 1.2 (18 Bé), vpravo 3.2 (25 Bé).

5.2.3 Nátěr č. 3

Nátěr fungoval jako prevence připečenin dostatečně ve všech případech. Jeho použití při větších naředěních by však mohlo být omezené kvůli tvorbě výronků, stejně jako je tomu v případě nátěru č. 2. Při naředění v poměru 1:2 na hodnotu 25 Bé byla kvalita povrchu plně dostačující i z hlediska výronků. Uvažovat lze i o použití při 22 Bé s naředěním 1:2,5.



Obr. 103 Pískem otryskané vzorky s použitím nátěru č. 3. Vlevo 1.3 (18 Bé), vpravo 3.3 (25 Bé).

5.3 Vliv ostřiva na JBS

Vlivem změny ostřiva by dle podkapitoly 4.2.2 bylo v ideálním případě možno na zkoumané formovací lince snížit dávkování kompenzačního ostřiva GL 16 o 40-50 % ze současné spotřeby okolo 2 200 t ročně. Změna by také umožnila snížit dávkování bentonitu a uhlíkatých přísad, potřebných k pokrytí jádrového a kompenzačního ostřiva, a to o 20-25%. Rovněž by došlo ke snížení množství deponované směsi pro danou formovací linku, a to přibližně o 12 %. Uvedená procenta jsou odvozena z údajů o provozních nákladech zkoumané linky.

5.4 Zhodnocení souhrnných opatření na případné úspory slévárny MAT

Využitím výše uvedených poznatků a jejich zavedením do výroby by mohlo být dosaženo těchto úspor:

Nátěry

Za předpokladu použití nátěru č. 1 s ředěním na 18 Bé mohou úspory vlivem snížené spotřeby nátěrového koncentrátu dosáhnout až 30 %.

Podmínkou by bylo dostatečné míchání nátěrové suspenze s cílem eliminovat tvorbu hrudek, které měl nátěr č. 1 tendenci tvořit. Jelikož u více naředěného nátěru prostupuje voda do větší hloubky jader, je potřeba počítat s delší dobou sušení, případně začlenit do výrobního procesu sušičku jader.

Přechod na jemnější jádrové ostřivo GL 21

Primární úspora na dávkování kompenzačního ostřiva GL 16 do regenerované směsi by mohla představovat 40-50 %. To představuje roční úsporu více než 1 000 t ostřiva.

Sekundární úsporu z celkového dávkování bentonitu a uhlikatých přísad na nové ostřívo (jádrové i kompenzační) lze odhadnout na 20-25 %, což představuje přibližně 130 t ročně.

Poslední úsporou by bylo snížení množství deponované směsi o výše uvedené množství kompenzačního ostřiva. Jednalo by se zde o přibližně 12 % z celkového množství deponované směsi na dané formovací lince.

Je ovšem nutno podotknout, že by v případě implementace těchto opatření bylo nezbytné jednotlivé parametry přizpůsobit danému provozu. Důvodem je větší množství specifických a v mnoha případech těžko ovlivnitelných faktorů. Skutečné výsledné úspory by tedy byly pravděpodobně poněkud nižší.

ZÁVĚR

Smyslem práce bylo zhodnocení možnosti předejít vzniku vad typu připečeniny na odlitcích z tvárné litiny v provozu slévárny MAT Ueckermünde, a to pomocí změny jádrového ostřiva z hrubšího GL 27 na jemnější GL 21, a vlivu této změny na JBS. Součástí práce bylo srovnání tří žáruvzdorných nátěrů, dodaných touto slévárnou. Nátěry byly podrobeny laboratorním zkouškám a jejich účinnost byla zkoumána i při použití na jádrech v podmínkách odpovídajících provozu této slévárny. Na základě výpočtů a zkoušek byly zhodnoceny možnosti jednotlivých opatření a jejich pozitivní ekonomický dopad na produkci slévárny MAT Ueckermünde.

V teoretické části diplomové práce byla provedena komplexní rešerše problematiky připečenin u odlitků z litiny a jejich možných řešení.

V rámci části teoretického řešení byly pomocí stanovení penetračního indexu provedeny výpočty pro predikci vzniku připečenin u jader bez nátěru s dvěma typy ostřiva – GL 27 a GL 21.

V části experimentálních zkoušek byly úspěšně provedeny laboratorní testy nátěrů, vytvořen návrh zkušebního jádra i odlitku, odpovídající předlohám z MAT Ueckermünde, a následně proveden test zapékání jader a účinnosti nátěrů.

V kapitole 5 byly analyzovány údaje získané z jednotlivých výpočtů a zkoušek. Na jejich základě byl vyhodnocen vliv změny jádrového ostřiva na kvalitu povrchu odlitků bez nátěru, vlastnosti jednotlivých testovaných nátěrů a také vliv změny jádrového ostřiva na JBS. Závěrem byla zhodnocena případná úsporná opatření při aplikaci ve slévárně MAT Ueckermünde.

Jemnější ostřivo má podstatný vliv na kvalitu povrchu odlitku s nenatřenými jádry. Přestože však na takovýchto jádrech nevznikají připečeniny, dochází k výskytu výronků a drsného povrchu. Proto je vhodné využívat žáruvzdorné nátěry. Ty mohou mít dostatečnou účinnost i při velmi vysokém naředění, což může snížit provozní náklady s nimi spojené. Jemnější jádrové ostřivo má i pozitivní vliv na JBS, u které snižuje míru hrubnutí její zrnitosti. S tím je spojeno menší dávkování kompenzačního ostřiva pro udržení konstantní zrnitosti JBS. Úspěšná aplikace všech výše zmíněných opatření by měla za výsledek nejen prevenci vady typu připečeniny, ale také úspory na nakupovaných materiálech, deponovaných odpadech a eventuálně i na případném obrábění.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [48]

- 1 MAT Ueckermünde. In: *MAT Foundry group Ltd.* [online]. Poole, United Kingdom: MAT Foundry Group Ltd., 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/Ueckermunde>
- 2 [Fixed brake caliper]. In: *MAT Foundry group Ltd.* [online]. Poole, United Kingdom: MAT Foundry group Ltd., 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/res/caliper-transparent-2.png>
- 3 [Floating brake caliper]. In: *MAT Foundry group Ltd.* [online]. Poole, United Kingdom: MAT Foundry group Ltd., 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/res/caliper-transparent-3.png>
- 4 [Differential case]. In: *MAT Foundry group Ltd.* [online]. Poole, United Kingdom: MAT Foundry group Ltd., 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/res/diff-case-transparent-4.png>
- 5 ELBEL, Tomáš. *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. Brno: MATECS, 1992.
- 6 HOLTZER, Mariusz, Marcin GÓRNY a Rafał DAŃKO. *Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings: The Effects of Mold Sand/Metal Interface Phenomena* [online]. 1. New York: Springer, 2015 [cit. 2022-05-18]. Springer Briefs in Materials. ISBN 978-3-319-14583-9. ISSN 2192-1105. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-14583-9
- 7 JELÍNEK, Petr a Karel RUSÍN. Vady povrchu odlitků. *Slévárství*. 1997, (6), 185-195.
- 8 STRÁNSKÝ, Karel, Karel RUSÍN a Radovan KOPLÍK. Vady odlitků - jejich klasifikace, příčiny a prevence. *Slévárství*. 1997, (4), 133-135.
- 9 ROWLEY, Mervin T. *International Atlas of Casting Defects*. 1. Des Plaines (Illionis): American Foundrymen's Society, 1993. ISBN 9780874330533.
- 10 Fig. 1: Balance of forces at the metal/mold boundary surface (schematic illustration). In: *Giessereilexikon* [online]. Schaffhausen, Switzerland: Foundry Technologies & Engineering GmbH [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.giessereilexikon.com/uploads/tx_d3ency/4071-01.png
- 11 *Giessereilexikon* [online]. Schaffhausen, Switzerland: Foundry Technologies & Engineering GmbH [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/>
- 12 Burnt -on sand. In: *Imeris* [online]. Kifissia, Greece: Imeris, 2015 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.imeris-additivesformetallurgy.com/wp-content/uploads/Green-moulding-sand-expertise-small.pdf>
- 13 Explosion penetration. In: *Imeris* [online]. Kifissia, Greece: Imeris, 2015 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.imeris-additivesformetallurgy.com/wp-content/uploads/Green-moulding-sand-expertise-small.pdf>
- 14 Fig. 3: Significantly pox-like appearance of the casting surface, magnification 25:1. In: *Giessereilexikon* [online]. Schaffhausen, Switzerland: Foundry Technologies & Engineering GmbH [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.giessereilexikon.com/uploads/tx_d3ency/4050-03.png
- 15 BURIAN, Alois a Jiří KŘÍSTEK. Vliv par kovů a cristobalitické expanze na vznik hlubokých zapečenin u ocelových odlitků. *Slévárství*. 1998, **36**(10), 412-421. ISSN 0037-6825.

-
- 16 STEFANESCU, D.M., S.R. GIESE, T.S. PIWONKA a A.M. LANE. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I: Physics of Penetration Defects and Penetration Model. In: *Transactions of the American Foundrymen's Society*. Des Plaines (Illinois): American Foundrymen's Society, 1997, s. 1233-1248. ISBN 1-87433-176-5.
 - 17 PTÁČEK, Tomáš. *Penetrace kovu do bentonitových formovacích směsí při odlévání litinových odlitků*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Antonín Záděra Ph.D.
 - 18 GIESE, S.R., D.M. STEFANESCU, J. BARLOW a T.S. PIWONKA. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II: Experimental Evaluation of Some Main Parameters Responsible for Penetration. In: *Transactions of the American Foundrymen's Society*. Des Plaines (Illinois): American Foundrymen's Society, 1997, s. 1249-1257. ISBN 1-87433-176-5.
 - 19 CAMPBELL, J. a R. NARO. Lustrous carbon on gray iron. *AFS Proceedings*. Schaumburg (IL USA): American Foundry Society, 2010.
 - 20 The Mould. CAMPBELL, John. *Castings*. 2. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, s. 99-116. ISBN 0 7506 4790 6.
 - 21 PATTABI, R., A.M. LANE a T.S. PIWONKA. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part III: Measurement of Mold-Metal Interfacial Gas Composition. In: *Transactions of the American Foundrymen's Society*. Des Plaines (Illinois): American Foundrymen's Society, 1997, s. 1259-1264. ISBN 1-87433-176-5.
 - 22 TOMEK, Ladislav, Ivo STACHOVEC a Jana TOMKOVÁ. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků: Studijní sylabus*. 1. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT.
 - 23 ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. 1. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
 - 24 NEUDERT, Alois. Penetrace - připečeniny u odlitků ze slitin železa. *Slévárenství*. 2011, **59**(11-12), 364-368.
 - 25 STEFANESCU, D., T. PIWONKA, S. GIESE a A. LANE. Mold Penetration in Sand Molds: A Fundamental Approach to Solving the Problem. In: *Transactions of the American Foundrymen's Society*. Illinois: American Foundrymen's Society, 1994, s. 789-796. ISBN 0-87433-164-1.
 - 26 STEFANESCU, D., M. OWENS, A. LANE, T. PIWONKA, K. HAYES a J. BARLOW. Penetration of Liquid Steel in Sand Molds Part I: Physics and chemistry of penetration and mathematical modeling - metal side. In: *Transactions of the American Foundrymen's Society*. Des Plaines (Illinois): American Foundryman's Society, 2001, s. 1347-1363. ISBN 0-87433-248-6.
 - 27 Vererzung. In: *Giesserei Praxis* [online]. Berlín, Německo: Schiele & Schön GmbH, 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.giesserei-praxis.de/giesserei-lexikon/glossar/vererzung>
 - 28 ROUS, Jan. Reoxidační pochody v dutině formy. *Slévárenství*. 1991, **39**(1-2), 33-41. ISSN 0037-6825.
 - 29 HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin: Studijní opora*. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3357-6.
 - 30 RUSÍN, Karel. *Slévárenské formovací materiály*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1991.
-

-
- 31 BROWN, John R. *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. 1. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0 7506 4284 X.
 - 32 NWAOGU, U. a N. TIEDJE. Foundry Coating Technology: A Review. *Materials Sciences and Applications* [online]. 2011, **02**(08), 1143-1160 [cit. 2022-04-02]. ISSN 2153-117X. Dostupné z: doi:10.4236/msa.2011.28155
 - 33 Introduction to foundry coatings. In: *Hüttenes-Albertus international* [online]. Hüttenes-Albertus [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://ha-international.com/pdf/Refractory%20Coating%20OverviewV1.pdf>
 - 34 TOMKOVÁ, Jana. *Postupy pro dosažení vyšší povrchové jakosti ocelových odlitků*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
 - 35 BEŇO, Jaroslav, Petr JELÍNEK a Nikol ŠPIRUTOVÁ. *Formovací směsi: Studijní opory*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2015.
 - 36 BURYAN, Petr, Jiří MITERA, Jiří HÁJEK, Miroslav SOCHOR a Milorad IVANOVIČ. *Pojivo pro ochranné slévárenské žáruvzdorné nátěry a postřiky*. Slovenská Republika. 237183. Uděleno 01.10.1987.
 - 37 BAKER, S. G. Evaluating refractory coatings: A practical approach. *Modern Casting*. 2002, **92**, 21-23.
 - 38 Elcometer. In: *BAMR* [online]. BAMR [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.bamr.co.za/elcometer-112-3236-hexagonal-stainless-steel-wet-film-combs/>
 - 39 STÖTZEL, Reinhard, Christian KOCH a Radek VONDRÁČEK. Dosažení lepší efektivity sléváren použitím nátěrů na formy a jádra připravených "na míru". *Slévárenství*. 2005, **53**(10), 472-475. ISSN 0037-6825.
 - 40 Cold Box: Product line overview. In: *Ask-Chemicals* [online]. Hilden (Germany): ASK Chemicals GmbH, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.ask-chemicals.com/fileadmin/user_upload/Download_page/foundry_products_brochures/EN/Cold_Box_Overview_EN.pdf
 - 41 Cold box process. In: *Giessereilexikon* [online]. Schaffhausen (Schweiz): Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E), 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/cold-box-process-4393/?cHash=21e68b6dc7f49ab340f1da2d4e91d548>
 - 42 Cold Box. In: *Hüttenes-Albertus international* [online]. Illinois: Hüttenes-Albertus, 2007 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.ha-international.com/content/products/resins/coldbox.aspx>
 - 43 KAŇOVÁ, Zdeňka. *Formovací materiály - Křemenná ostřiva: Výuková prezentace*. Clariant, 2020.
 - 44 KAŇOVÁ, Zdeňka. *Srovnání technologických vlastností křemenných písků s ohledem na výrobu slévárenských forem*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav geologických věd. Vedoucí práce RNDr. Václav Vávra, Ph.D.
 - 45 SEDLÁČKOVÁ, Petra. *Ostřiva slévárenských formovacích směsí*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
 - 46 DISA INDUSTRIES. *DISA 250-C Sand Moulding System: Application manual*. Edition 02-04. Denmark: DISA Industries A/S, 2004. Reg. No. 9156 H 4710.
-

- 47 DE BUREAU DE NORMALISATION DES INDUSTRIES DE LA FONDERIE.
Caractérisation d'états de surface des pièces moulées: Utilisation d'echabillons-types de 160 mm × 110 mm. Editions Techniques des Industries de la Fonderie, 1996.
Technické doporučení č. 359.
- 48 *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. Brno: Citace.com, s.r.o., 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
A_c	obsah povrchu jádra	[m ²]
A_p	plocha známky	[m ²]
AFS	parametr zrnitosti podle American Foundry Society	[-]
$D_{vnější}$	vnější průměr mezikruží odlitku	[cm]
$D_{vnitřní}$	vnitřní průměr mezikruží odlitku	[cm]
d	hloubka prohřátí jádra	[m]
d_{25}	¼ průměr zrn ostřiva	[mm]
d_{50}	střední průměr zrna ostřiva	[mm]
d_{75}	¾ průměr zrn ostřiva	[mm]
d_p	průměr kapiláry/pórů	[mm]
g	gravitační konstanta	[m/s ²]
h	výška sloupce kovu	[m]; [cm]
$h_{jádro}$	výška jádra v odlitku	[mm]
h_{pen}	hloubka ve formě, pod kterou bude docházet k mechanické penetraci	[m]
h_x	výška daného bodu oproti referenční nulové hodnotě	[m]
h_{zk}	výška zkušební tělesa	[mm]
K	prodyšnost	[j.p.]
K_0	prodyšnost nenatřeného vzorku	[j.p.]
K_1	prodyšnost natřeného vzorku	[j.p.]
k_1	sklon k závislosti úhlu smáčení na teplotě	[-]
L	délka známky	[m]
L_p	hloubka penetrace taveniny do formovací směsi	[m]
$m_{odlitek}$	hmotnost samotného odlitku	[kg]
P	tlak	[Pa]
P_{CO}	parciální tlak CO	[Pa]
P_{CO_2}	parciální tlak CO ₂	[Pa]
P_I	penetrační index	[-]
P_{dyn}	dynamický tlak	[Pa]
P_e	prodyšnost	[j.p.]
P_{exp}	tlak od expanze grafitického eutektika	[Pa]
P_f	ztráta tlaku vlivem tření mezi kovem a formou	[Pa]
P_{gas}	tlak od plynů formy	[Pa]
P_{met}	metalostatický tlak kovu	[Pa]
P_{pen}	kapilární tlak bránící penetraci	[Pa]
P_γ	kapilární tlak	[Pa]
p_x	tlak v daném bodě	[Pa]
Δp	přetlak protlačovaného vzduchu	[Pa]
Q	průtok taveniny	[kg/s]
Q_{gas}	míra vývinu plynů jádrové směsi	[ml/g*s]
r_p	poloměr mezizrnových prostor	[m]
S	plocha/ průřez	[m ²]
T	teplota	[°C]
T_1	teplota měření vývinu plynů	[K]
T_2	teplota jádra od prohřátí kovu	[K]
T_{cs}	kritická teplota, kdy se úhel smáčení blíží nule	[°C]
t	čas	[s]

V	objem	[m ³]
v	rychlost proudění kovu	[m/s]
v _p	rychlost vnikání kovu do materiálu formy	[m/s]
v _x	rychlost proudění v daném bodě	[m/s]
Y _H	hydrodynamické odpory	[-]
γ	povrchové napětí	[J/m ²]; [dyn/cm]
γ _{LV}	povrchové napětí na rozhraní kapalina – atmosféra	[J/m ²]
γ _{SV}	povrchové napětí na rozhraní pevný podklad – atmosféra	[J/m ²]
γ _{LS}	povrchové napětí na rozhraní kapalina – atmosféra	[J/m ²]
δ _n	tloušťka vrstvy nátěru	[mm]
θ	úhel smáčení	[°]
θ _A	skutečný úhel smáčení formovací směsi taveninou	[°]
θ _{cr}	kritický úhel smáčení formovací směsi taveninou	[°]
μ	dynamická viskozita	[Pa*s]
ρ	měrná hmotnost	[kg/m ³]
ρ _c	měrná hmotnost jádra	[kg/m ³]
ρ _l	měrná hmotnost taveniny	[kg/m ³]
ρ _{litina-l}	měrná hmotnost litiny v tekutém stavu	[kg/m ³]
ρ _{litina-s}	měrná hmotnost litiny v tuhém stavu	[g/cm ³]
σ _{LV}	povrchové napětí mezi kapalnou a plynnou fází	[N/m]
τ	čas, za který projde přes váleček objem vzduchu	[s]

Zkratky

Označení	Legenda
BNIF	Bureau de Normalisation des Industries de la Fonderie
CB	cold-box
DMEA	dimetyletylamin
DMIA	dimetylisopropylamin
FSI	Fakulta strojního inženýrství
hm. %	hmotnostní procenta
IPA	isopropanol
JBS	jednotná bentonitová směs
KUM	kamenouhelná moučka
LKG	litina s kuličkovým grafitem
LLG	litina s lupínkovým grafitem
Mg _{zbyt}	zbytkový hořčík
PU	polyuretan
ST	samotuhnoucí (směs)
TEA	triethylamin
VUT	Vysoké učení technické

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technický list ostřiva GL 16

Příloha 2 Technický list ostřiva GL 21

Příloha 3 Technický list ostřiva GL 27

Příloha 4 Zvětšené fotografie zkoumaných nátěrů

Příloha 5 Schéma odstupňování kvality povrchu litinových odlitků dle etalonů BNIF [47]

Příloha 6 Etalony struktury povrchu BNIF [47]

Příloha 7 Fotografie struktury povrchu odlitků