



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PENETRACE TAVENINY DO JADER PŘI ODLÉVÁNÍ LITINOVÝCH ODLITKŮ

PENETRATION OF MELT INTO CORES DURING CASTING OF CAST IRON CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavla Karešová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Pavla Karešová**
Studijní program: Slévárenská technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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:

Penetrace taveniny do jader při odlévání litinových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Litinové odlitky jsou nejčastěji odlévány do bentonitových formovacích směsí. Vnitřní dutiny odlitků jsou zpravidla vyráběny z jádrových směsí. Pro tyto směsi je nejčastěji používáno pojiv na bázi uretanových pryskyřic, které jsou vytvrzovány pomocí katalyzátorů na bázi plynných aminů (COLD BOX). Kvalita povrchu odlitku je však závislá nejen na podmínkách odlévání, jako jsou např. chemické složení nebo teplota odlévaného kovu, ale také na kvalitě a provedení slévárenské formy nebo jádra. Pro zajištění požadované kvality povrchu odlitku je nutné volit vhodnou zrnitost ostřiva, množství i typ pojiva i případně vhodná aditiva do formovacích i jádrových směsí. V případě nevhodné zrnitosti nebo složení jádrové či formovací směsi, příp. nevhodné lící teploty a konstrukci formy a odlitku může v průběhu odlévání a chladnutí odlitku docházet k lokální penetraci taveniny do jádra nebo formy. Vzniklé vady patří mezi povrchové vady odlitku, které jsou sice zpravidla vady opravitelné, ale ve svém důsledku mohou vést ke značnému zvýšení výrobních nákladů a v mezním případě i k nerentabilní výrobě daného odlitku.

Cíle diplomové práce:

Provedení literární rešerše zaměřené na problematiku penetrace taveniny do formovacích a jádrových směsí při odlévání litinových odlitků odlévaných do bentonitových forem. Experimentálně bude ověřen vliv organických i anorganických aditiv přidávaných do jádrových směsí na drsnost povrchu litinových odlitků a případný vliv na vznik připečenin a penetrací kovu do těchto směsí. Cílem experimentu bude ověřit a statisticky vyhodnotit funkčnost jednotlivých aditiv z hlediska požadavků na povrchovou kvalitu litinových odlitků pro automobilový průmysl.

Seznam doporučené literatury:

STEFANESCU, D.M.; GIESE, S.R.; PIWONKA, T.S. a LANE, A.M. 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: Transactions of the American Foundrymen's Society, 1996, s. 1233-1248. ISBN 1-87433-176-5.

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

PTÁČEK, T. 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.

GIESE, S.R.; STEFANESCU, D.M.; BARLOW, J. a PIWONKA, T.S. 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: Transactions of the American Foundrymen's Society, 1996, s. 1249-1257. ISBN 1-87433-176.

ROUČKA, J. Metalurgie litin. 1. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.

NEUDERT, A. Penetrace - připečeniny u odlitků ze slitin železa. Slévárenství. 2011, 59(11-12), s. 364-368. ISSN 0037-6825.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou penetrace taveniny do formovacích a jádrových směsí u odlitků z litiny s lupínkovým grafitem při odlévání do bentonitových forem. Cílem této práce je experimentálně ověřit vliv organických a anorganických aditiv přidávaných do jádrových směsí na vznik tzv. připečenin, penetraci kovu a drsnost povrchu odlitku. V rámci experimentu byla provedena literární rešerše zaměřená na mechanismy vzniku těchto vad a jejich možné eliminace. Experimentální část proběhla ve slévárně MAT Ueckermünde a soustředí se na statistické vyhodnocení účinnosti organických a anorganických aditiv s ohledem na rostoucí požadavky automobilového průmyslu. Nakonec by výsledky této diplomové práce měly přispět k optimalizaci složení jádrových směsí a k minimalizaci povrchových vad litinových odlitků. To by mohlo vést ke snížení výrobních nákladů a zvýšení produktivity výroby.

Klíčová slova

aditiva, brzdový kotouč, cold-box, penetrace, připečeniny, ostřívo, jaderník, jádro, vtoková soustava, žáruvzdorné nátěry

ABSTRACT

The master's thesis deals with the issue of metal penetration into molding and core mixtures in castings made of gray cast iron during casting into the green sand molds. The aim of this diploma project is to experimentally verify the influence of organic and inorganic additives added to core mixtures on the formation of burn-on defects, metal penetration and the roughness of the surface casting. As part of the experiment, a literature analysis was carried out, focusing on the mechanisms of these defects and their possible elimination. The experimental part was performed out at the MAT Ueckermünde foundry and focuses on the statistical evaluation of the effectiveness of organic and inorganic additives about the increasing demands of the automotive industry. Finally, the results of this master's thesis should contribute to optimizing the composition of core mixtures and minimizing surface defects in gray cast iron castings, which could lead to lower production costs and increased manufacturing productivity.

Keywords

additives, brake disc, burn-on, cold-box, core, core box, gating system, molding sand, penetration, refractory coatings

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAREŠOVÁ, Pavla. *Penetrace taveniny do jader při odlévání litinových odlitků*. Online, diplomová práce. Antonín ZÁDĚRA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165854>. [cit. 2024-12-26].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Penetrace taveniny do jader při odlévání litinových odlitků* vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně 22.5.2025

místo, datum

Bc. Pavla Karešová

jméno, příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce za cenné připomínky, rady a podporu, které mi poskytl při vypracování diplomové práce a při řešení zadané problematiky. A také děkuji mé rodině za podporu po celé mé vysokoškolské studium.

Zároveň bych chtěla poděkovat Robertu Hemalovi, Davidu Hrazdírovi a Ondřeji Chýlovi za možnost vypracovat diplomovou práci ve společnosti MAT Foundries Ueckermünde, za jejich čas, který mi věnovali, a za jejich cenné připomínky.

Nakonec patří mé poděkování všem pracovníkům slévárny MAT Ueckermünde, kteří se podíleli na řešení zadané problematiky a poskytli mi svou podporu.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 Hlavní cíl diplomové práce a úvod do problematiky	13
2 Kvalita odlitku	14
2.1 Klasifikace vad povrchu odlitku.....	14
2.1.1 Drsný povrch	15
2.1.2 Povrchové připečeniny	16
2.1.3 Hluboké připečeniny – zapečeniny.....	17
2.2 Zkoušky připečenin	18
3 Mechanismy penetrace kovu	21
3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace).....	21
3.2 Penetrace prostřednictvím chemických reakcí (chemická penetrace).....	27
3.3 Penetrace za spoluúčasti par kovu	30
3.4 Penetrace způsobená výronky kovu do jader pomocí cristobalitické expanze.....	31
3.5 Penetrace způsobená explozí vody (explozivní penetrace).....	33
3.6 Penetrace vycezováním (expanzní penetrace).....	34
4 Technologie výroby jader metodou cold-box.....	36
4.1 Vývoj technologie	36
4.2 Princip technologie cold-box.....	37
4.3 Pojivový systém	39
4.4 Ostřívo	41
4.5 Cold-box proces ve slévárně v MAT Foundries v Ueckermünde	43
4.6 Výhody/nevýhody a vývojové etapy pojivového systému cold-box.....	44
5 Prevence proti penetraci kovu	46
5.1 Požadované vlastnosti na slévárenské nátěry pro zabránění penetrace kovu do jádrové/formovací směsi.....	46
5.2 Základní složky žáruvzdorných nátěrů.....	46
5.2.1 Plnivo.....	47
5.2.2 Pojivo.....	48
5.2.3 Nosná kapalina	49
5.2.4 Přísady	49
5.3 Druhy nátěrů a jejich funkce	50
5.4 Nanášení nátěrů	50
5.5 Aditiva	51
6 Experimentální část	52
6.1 Návrh zkušebního odlitku a jádra.....	52

6.1.1	Zkušební odlitek	52
6.1.2	Zkušební jádro	53
6.1.3	Výpočet geometrického modulu odlitku	53
6.1.4	Výpočet a návržení nálitku (feeder calculation).....	54
6.2	Výroba jaderníku a zkušebních jader	55
6.2.1	Jaderník.....	55
6.2.2	Jádrová směs.....	56
6.2.3	Aditiva	57
6.2.4	Dávkování aditiv.....	58
6.2.5	Výroba zkušebních jader	59
6.2.6	Optimalizace výroby jader.....	61
6.3	Výroba modelu a forem.....	61
6.3.1	Uložení modelu na modelové desce	61
6.3.2	Navržení vtokové soustavy.....	62
6.3.3	Zakladač jader.....	63
6.3.4	Výroba modelu	63
6.3.5	Výroba forem.....	64
6.4	Lití	65
6.4.1	Materiál.....	65
6.4.2	Výpočet kritického úhlu smáčení	66
6.4.3	Výpočet skutečného úhlu smáčení	67
6.4.4	Výpočet penetračního indexu	67
6.4.5	Simulace výroby experimentu zkušebního odlitku	68
6.4.6	Průběh lití	70
7	Vyhodnocení výsledků experimentu	71
7.1	Výsledky vizuální kontroly	71
7.2	Výsledky 3D skenování.....	72
7.3	Statistické vyhodnocení.....	74
7.4	Experimentální plán měření rovinnosti	74
7.5	Box plot (krabicový diagram – analýza hrubých chyb)	74
7.6	Test normality (Summary report).....	75
7.6.1	Test na rovnost rozptylů (Leveneův test)	76
7.6.2	Test na rovnost středních hodnot (Tukeyho a Fisherův test).....	78
7.6.3	Statistické porovnání přínosu jednotlivých směsí	82
7.7	Závěr ze statistického vyhodnocení	85
7.8	Analýza shody a rozptylu	86
7.8.1	Procentuální vyjádření shodných výrobků	86
7.8.2	Porovnání směrodatné odchylky rovinnosti	87
7.8.3	Porovnání střední hodnoty rovinnosti.....	88
7.8.4	Závěr analýzy shody a rozptylu.....	89
7.9	Měření drsnosti povrchu zkušebního odlitku	89
7.10	Závěr experimentu.....	94
8	Zhodnocení produktivity výroby jader	96

ZÁVĚR..... 97

Seznam použitých zdrojů

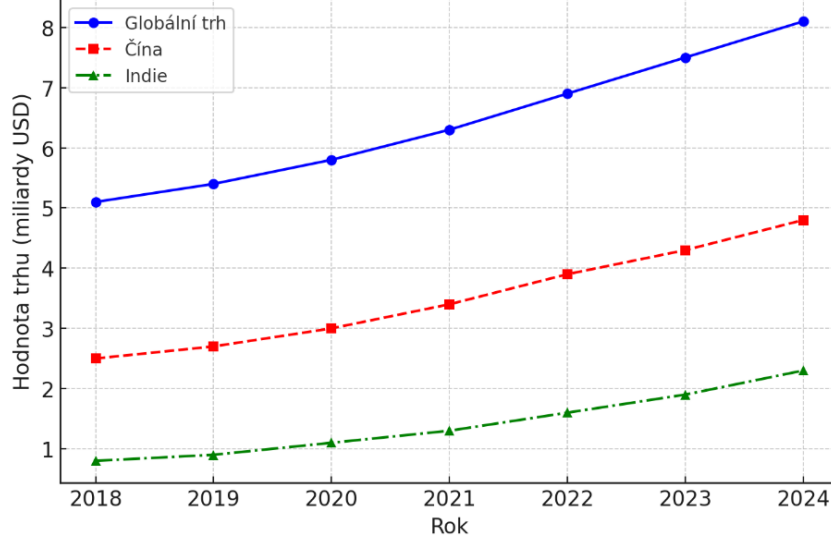
Seznam použitých symbolů a zkratk

ÚVOD

Litinové odlitky představují klíčovou technologii moderního průmyslu, zejména v oblasti automobilové výroby. Díky své výborné obrobiteľnosti, vyhovující pevnosti, tepelné vodivosti a schopnosti tlumit vibrace nacházejí široké uplatnění v konstrukci motorů, převodovek a brzdových systémů. Mezi nejběžnější typy litin používané v automobilovém průmyslu patří litina s lupínkovým grafitem (GJL) a litina s kuličkovým grafitem (GJS), které nabízejí optimální kombinaci mechanických a fyzikálních vlastností při nízkých výrobních nákladech.

Jednou z nejvýznamnějších aplikací litiny v automobilovém průmyslu jsou brzdové kotouče, které hrají zásadní roli při zajištění bezpečnosti vozidla. V současné době se výroba brzdových kotoučů řadí mezi nejdůležitější součásti v automobilovém průmyslu. Mezinárodní automobilový trh s brzdovými systémy začal v roce 2023 rychle narůstat (Obr. 1) [1; 2; 3]. Zvýšila se poptávka klientů po bezpečnostních prvcích, např. ABS systému (protiblokovací systém).

Asie pokrývá přibližně 59 % celkové výroby vozidel. To má za příčinu její dominanci na světovém trhu s brzdovými systémy. Mezi největší výrobce automobilů v rámci Asie je potřeba zmínit Čínu a Indii. Nicméně Evropa a Severní Amerika také významně přispívají k poptávce po pokročilých brzdových systémech (viz Obr. 1). [1; 2; 3]



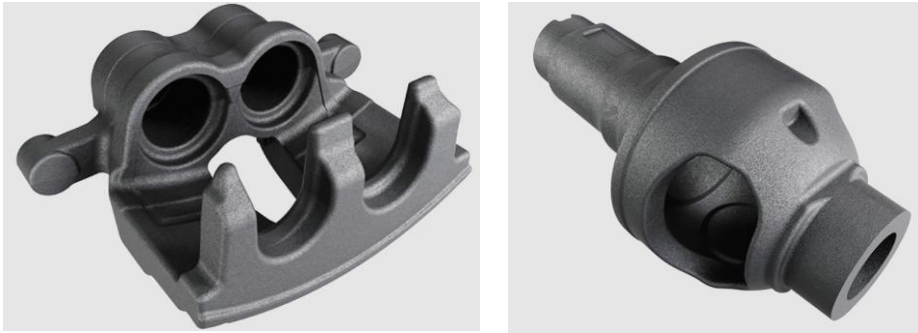
Obr. 1 Globální růst trhu s brzdovými kotouči [2].

Výroba brzdových kotoučů je velmi komplexní a vyžaduje mnoho pozornosti. Je také požadována vysoká tepelná vodivost, odolnost proti opotřebení a velkému mechanickému zatížení. Výběr materiálu a výrobní metody jsou rozhodující pro výkon hotového výrobku, včetně koroze, opotřebení a odolnosti proti teple.

Pro zhotovení brzdových kotoučů je možné použít vícero metod, jako je např. kování a obrábění. Jedním ze základních procesů výroby zůstává slévárenství. Proč slévárenství? Náklady na výrobu jsou nižší než u výše zmíněných metod. Lití může probíhat do písku, což představuje nejdostupnější metodu lití. Je také možné mluvit o tvarování do skořepiny, to je velice přesná metoda, nicméně náročná na pořizovací náklady. Nejpoužívanější materiál představuje litina s lupínkovým grafitem (GJL) díky jejím příznivým mechanickým vlastnostem.

Experimentální část diplomové práce byla zrealizována ve spolupráci s německou firmou MAT Foundries Europe, která je součástí rodiny společností MAT Holdings Inc. Vyrábí kvalitní díly z litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem pro automobilové a průmyslové aplikace. Slévárna MAT Foundries nacházející se ve městě Ueckermünde je zaměřena především na výrobu pro automobilový průmysl s roční kapacitou okolo 65 000 t odlitého

kovu [4]. Odlitky se odlévají na dvou vysoce produktivních linkách Disamatic s jednotnou bentonitovou směsí (JBS). Příklad zhotovených odlitků se nachází na obrázku (Obr. 2) [5]. Pro odlitky s komplexní geometrií jsou zapotřebí jádra. V případě německé slévárny se používají jádra vyrobená polyuretanovým procesem cold-box (CB).



Obr. 2 Přehled produktů z MAT Ueckermünde. Na levé straně se nachází brzdový třmen a na pravé straně diferenciální skříň [5].

1 HLAVNÍ CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE A ÚVOD DO PROBLEMATIKY

CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této práce bylo provedení literární rešerše zaměřené na problematiku penetrace taveniny do formovacích a jádrových směsí při výrobě litinových odlitků odlévaných do bentonitových forem. V rámci experimentální části byl zkoumán vliv organických i anorganických aditiv přidávaných do jádrových směsí na drsnost povrchu litinových odlitků a jejich potenciální vliv na vznik tzv. připečenin a penetraci kovu do těchto směsí. Hlavním cílem experimentu bylo ověření a statistické vyhodnocení účinnosti jednotlivých aditiv z hlediska požadavků na povrchovou kvalitu litinových odlitků, zejména s ohledem na potřeby automobilového průmyslu.

PROBLEMATIKA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Litinové odlitky jsou běžně vyráběny do bentonitových formovacích směsí, přičemž vnitřní dutiny odlitků jsou vytvářeny z jader zhotovených z jádrových směsí. Pro tyto směsi se obvykle využívají pojiva na bázi uretanových pryskyřic, která se vytvrzují prostřednictvím katalyzátorů obsahujících plynný amin (metoda cold-box). Kvalita povrchu odlitku však závisí nejen na samotném procesu odlévání, jako je chemické složení nebo teplota taveniny, ale také na precizním provedení slévárenské formy či jádra.

K dosažení požadované kvality povrchu odlitku je nezbytné správně zvolit zrnitost ostřiva, množství a typ pojiva, případně přidat vhodná aditiva do formovacích i jádrových směsí. Pokud není zajištěna optimální zrnitost nebo složení směsí, případně jsou nevhodně zvoleny lící teploty či konstrukce formy a odlitku, může během procesu odlévání a chladnutí dojít k lokální penetraci taveniny do formy nebo jádra. Takto vzniklé povrchové vady odlitků mohou být sice opravitelné, avšak často vedou ke zvýšení výrobních nákladů. V krajním případě mohou způsobit i ekonomickou nerentabilitu výroby daného odlitku.

DÍLČÍ CÍLE

- Analyzovat dostupné odborné zdroje týkající se problematiky penetrace taveniny do formovacích a jádrových směsí při odlévání litinových odlitků.
- Určit hlavní parametry ovlivňující kvalitu povrchu litinových odlitků.
- Specifikovat organická i anorganická aditiva používaná v jádrových směsích a jejich očekávaný vliv na povrchovou kvalitu odlitků.
- Navrhnout metodiku experimentálního testování vlivu aditiv na drsnost povrchu litinových odlitků a vznik vad.
- Statisticky analyzovat a interpretovat výsledky experimentu s cílem určit nejefektivnější aditiva z hlediska snížení penetrace kovu a zvýšení povrchové kvality odlitků.
- Na základě zjištěných poznatků formulovat doporučení pro optimalizaci složení jádrových směsí s cílem minimalizace vad a zvýšení efektivity výroby.

2 KVALITA ODLITKU

Mnoho firem vynakládá až třetinu svých nákladů zejména ve výrobních odvětvích na opravy vad. Musí zajistit náhradu za neshodné výrobky, možné opravy a řešit reklamace zákazníků. [6]

Proces odlévání umožňuje výrobu složitých tvarů s minimálním obráběním, např. metoda přesného lití, nicméně je náchylný k tvorbě vad z důvodu přechodu z kapalné fáze do tuhé, který je složité korigovat. Technologické postupy jsou důležité pro zhotovení tzv. zdravého odlitku, což se týká např. lící teploty. V případě nesprávné hodnoty dochází k růstu zmetkovitosti a nákladů na jejich následnou opravu [7].

Správná diagnostika může ušetřit čas, náklady a počet vad [6].

Vady odlitků představují odchylky ve vzhledu, tvaru, hmotnosti, rozměrech nebo celistvosti. Následně jsou dělitelné na:

- zjevné: vady, které jsou viditelné pouhým okem;
- skryté: vady, které se objeví až po odebrání materiálu, tzv. obráběním. [6]

Dále rozlišujeme vady:

- přípustné (akceptovatelné);
- nepřípustné (lze je opravit nebo vedou k neshodným výrobkům). [6]

Některé vady vedou k vyřazení odlitku, ten je považován za neshodný výrobek, jiné lze opravit. Ve slévárnictví je hlavní rozlišit výrazy jako výrobek bez vad, kvalitní výrobek a nakonec neshodný výrobek. Cílem je vyrobit výsledný produkt bez vad; ale i kvalitní odlitek může mít určité vady neovlivňující jeho funkčnost, aniž by se jednalo o neshodný výrobek. [7]

2.1 Klasifikace vad povrchu odlitku

Odstranění vad odlitků může být časově i finančně náročné a v mnoha případech zcela vyloučené. Tyto vady mohou negativně ovlivnit nejen povrchovou kvalitu odlitku, ale také jeho mechanické vlastnosti, což může vést ke snížení celkové kvality a funkčnosti výrobku. Spektrum možných vad odlitků je široké, přičemž příčiny jejich vzniku jsou rozmanité a často vedou k výrazným nedokonalostem konečného produktu. [8; 9]

Vady povrchu tvoří přibližně 10–11 % [8] z celkového množství neshodných výrobků. Většina těchto odlitků je opravitelná, nicméně opravy můžou být náročné jak na čas, tak i z ekonomického hlediska. Odlitky odlité do kokil mají lepší kvalitu povrchu a vyšší přesnost oproti odlitkům odlévaným do pískových forem, kde se vyskytuje většina povrchových vad. [6; 8; 10]

Třída povrchových vad zahrnuje dohromady osm skupin s 23 specifickými typy vad. Přímý vliv na životnost nebo funkčnost součástí v mnoha případech nemají, jedná se z velké části pouze o vizuální nedokonalosti, jako jsou určité výstupky a nárůsty na povrchu odlitku. Zákazníci ve většině případů rozhodují v závislosti na rozsahu a typu vady, zda jsou přípustné nebo nepřípustné. [4; 11; 12; 13]

Povrchové vady se v současné době na území České republiky dělí podle normy ČSN 42 1240 z roku 1964, což je druhé vydání této normy. Tato norma je však považována za zastaralou, především kvůli nedostatečnému členění vad. Ing. Elbel v roce 1992 ve své práci *Vady odlitků ze slitin železa* [11] toto rozdělení přepracoval. Klasifikoval je do tříd podle vnějších znaků, které jsou dále rozděleny dle druhu a vzniku vady. [9]

Pro tuto práci bude primárně využita klasifikace podle Ing. Elbela a jeho díla [11]. Ve své práci zařazuje vady související s procesem penetrace (vady povrchu) do třídy 200

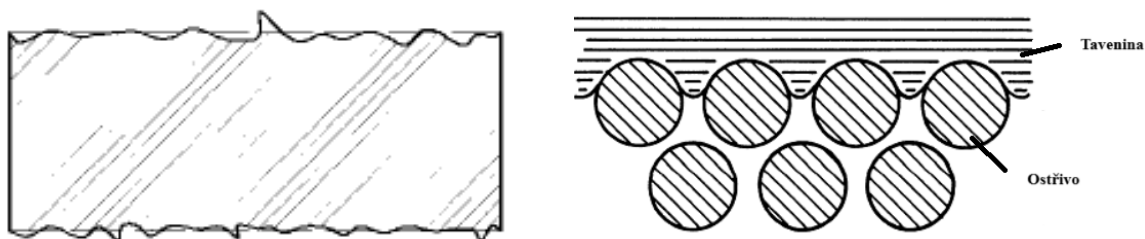
a připečeniny do skupiny 210, kterou dále rozděluje na tři podskupiny na základě hloubky zapenetrování: drsný povrch, povrchové připečeniny a hluboké připečeniny – zapečeniny (Tab. 1). [9; 14]

Tab. 1 Roztřídění vad odlitků podle tříd, skupin a typu vad podle Ing. Tomáše Elbela [11; 12].

Třída vad		Skupina vad		Typ vad	
Číslo	Název	Číslo	Název	Číslo	Název
200	vady povrchu	210	připečeniny	211	drsný povrch
				212	povrchové připečeniny
				213	hluboké připečeniny

2.1.1 Drsný povrch

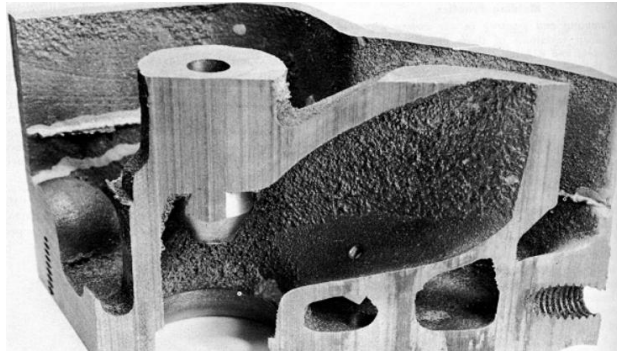
Vada odlitku, která se může vyskytnout u všech odlitků, zejména u těch vyrobených procesem lití do písku. Tato vada je způsobena mechanickou penetrací tekutého kovu do mezizrnového prostoru. Drsný povrch odlitku vzniká díky dokonalému smáčení líce pískové formy tekutým kovem, přičemž penetrace zasahuje do poloviny průměru zrna ostřiva. Vada je viditelná pouhým okem. Drsný povrch se může vyskytnout v místech vystavených vysokému tepelnému zatížení. Vrstvička písku na povrchu odlitku se snadno oddělí, nicméně následný proces čištění ovlivní pozitivně, ale i negativně povrchovou drsnost litého procesu. [11; 15; 16] Schematické znázornění podmínek na hraničním povrchu kov/forma je ukázáno na obrázku (Obr. 3).



Obr. 3 Schéma vady [17].

Drsnost povrchu je jednou z méně závažných vad, která však může ovlivnit vzhled a kvalitu litinových odlitků, u nichž nedošlo k tepelnému zpracování. U grafitizujících slitin, jako je litina s lupínkovým (GJL) či kuličkovým grafitem (GJS), se tato vada projevuje výrazněji, a sice kvůli vysoké zabíhavosti a schopnosti taveniny do detailu kopírovat všechny nerovnosti povrchu odlitku. Pro získání hladkého povrchu výrobku je např. u litiny GJL využíváno několika uhlíkových přísad nebo grafitových nátěrů, které podporují metalofobnost slévárenské formy. Metalofobnost představuje vlastnost formy odolávat smáčení roztaveným kovem. Schopnost formy odpuzovat tekutý kov napomáhá zabránit jeho přilnutí k povrchu formy už ve fázi lití [11].

Nedostatečné upěchování formovací směsi, nevhodné složení nebo úprava formovací směsi, hlavně velká velikost zrn písku, možné znečištění formovací směsi např. struskou, špatně vysušená forma, vysoká teplota lití nebo nepoužití ochranných nátěrů jsou hlavní příčiny, které vedou ke vzniku hrubého povrchu [12; 14]. Na obrázku (Obr. 4) je zachycen odlitek v řezu obsahující zdrsňelý povrch.



Obr. 4 Příklad drsného povrchu na zhotoveném odlitku [17].

Drsnost ploch odlitku se posuzuje vizuálně a následně pomocí komparační metody podle normy ČSN 01 4456 /7/. Drsnost se porovnává s kovovými etalony při umělém světle. Hodnoty drsnosti se pohybují v rozmezí 4–100 μm R_a (definováno jako střední aritmetická odchylka). [11; 12; 18]

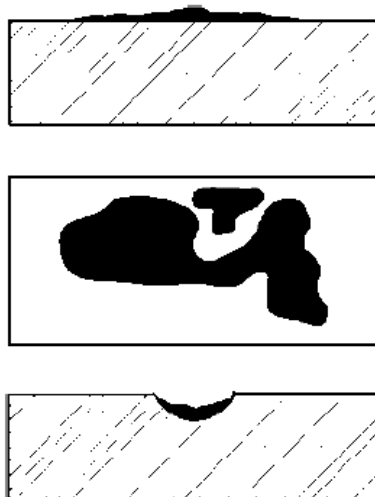
Pro odstranění vady se používají metody např. tryskání (jako jsou kovové broky) nebo odebrání materiálu tzv. obráběním, což představuje velice časově náročný proces. Avšak volbou nevhodných tryskacích prostředků i dobou tryskání může také dojít ke zhoršení povrchové vrstvy. [19]

2.1.2 Povrchové připečeniny

Povrchová připečenina je poměrně tenká vrstva písku, která v důsledku mechanické penetrace kovu přes zrna písku pevně přilne k povrchu odlitého výrobku. Tím vzniká vrstva písku a kovu, často se nachází na rovných plochách, horkých částech odlitku a převážně u tlustostěnných odlitků. V tomto případě kov penetruje do větší hloubky než polovina průměru zrna ostřiva. [11; 19]

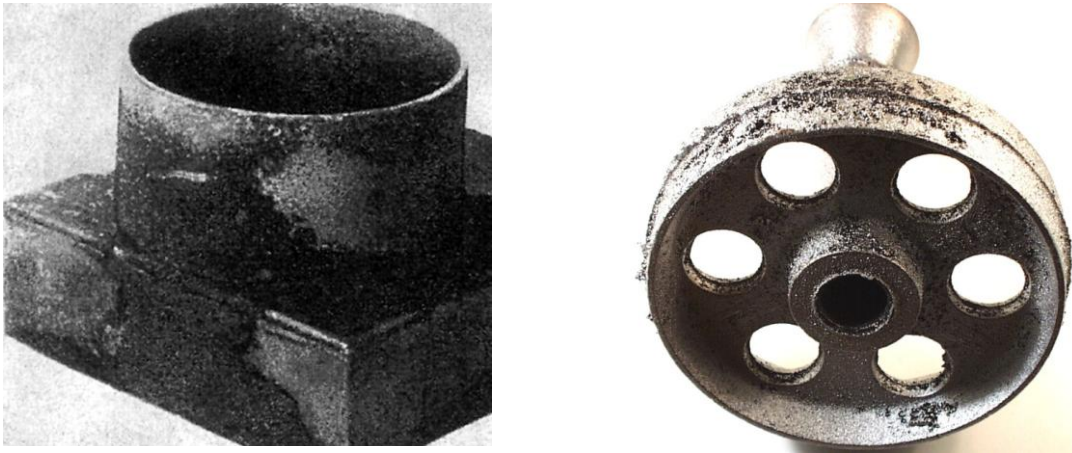
Kromě mechanického působení zde dochází i k chemickým reakcím mezi tekutým kovem a zrnky písku, což má za příčinu jejich velice obtížné odstranění kvůli zvyšující se pevnosti připečenin. V důsledku těchto fyzikálních procesů je odstraňujeme broušením či tryskáním. [4; 8; 9]

Pro zabránění vzniku této vady je třeba optimalizovat teploty lití, zvýšit kvalitu formovací/jádrové směsi, popřípadě do formovací směsi (litiny) přidat uhlíkatou přísadu nebo provést ochranný nátěr formy. Je také zapotřebí zajistit rovnoměrné zhuštění formy. Na obrázku (Obr. 5) je možné vidět názorné schéma vady. [20; 21]



Obr. 5 Schéma vady „povrchová připečenina“ [9].

Na obrázku (Obr. 6) na levé straně se nachází příklad připečené směsi na odlitku s vločkovým grafitem způsobené nečistotami v použitém křemenném písku (obsah $\text{SiO}_2 < 91 \%$) a na pravé straně se nachází příklad odlitku z hliníkové slitiny, kde je hlavní příčinou nedostatečné zhutnění formy a vysoká teplota lití. [20]

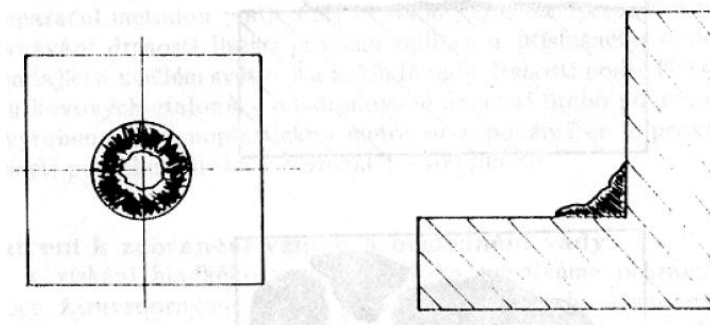


Obr. 6 Příklad odlitků s vadou povrchu, zejména „povrchové připečeniny“ [20].

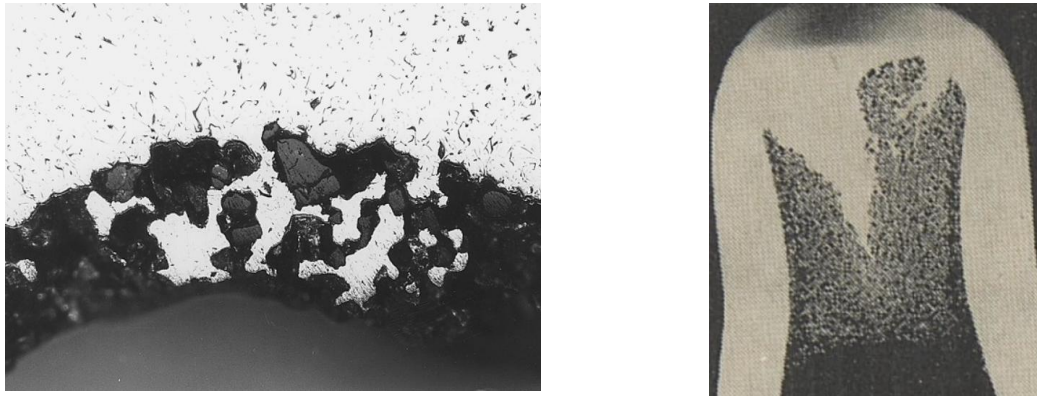
2.1.3 Hluboké připečeniny – zapečeniny

Hluboké připečeniny se zařazují k nejzávažnějším vadám způsobeným, stejně jako u předchozího typu vad, penetrací kovu do formovací/jádrové směsi. V tomto případě může kov proniknout až několik centimetrů hluboko do formy. Následně vzniká pevná vrstva kovu a formovací směsi, kterou je složité odstranit pomocí mechanických metod. Mechanickými metodami se rozumí odsekávání, broušení atd. Připečeniny se vyskytují zejména v tepelně namáhaných místech, kde dochází k silnému prohřátí formy, jako jsou tepelné uzly, krčky náliťků apod. Tento jev se vyskytuje zejména u masivních ocelových a litinových odlitků. [4; 11; 19; 22]

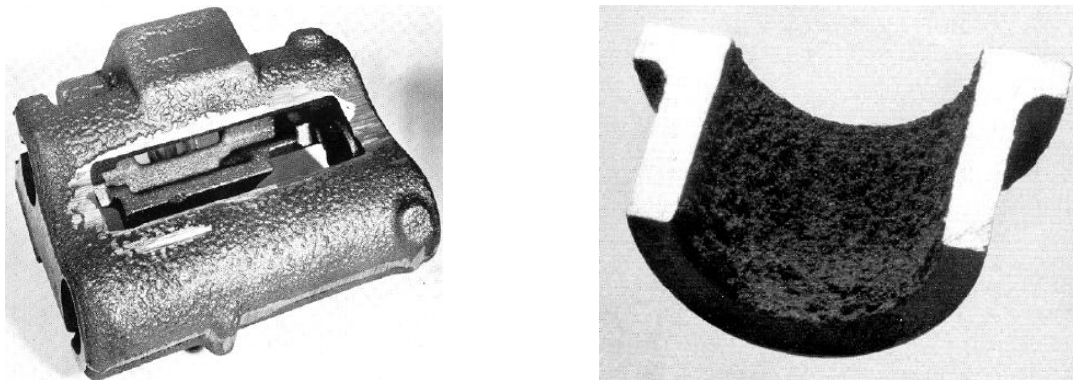
Povrch hlubokých připečenin má sklovitý vzhled s tzv. d'olíčky a zároveň kov vniká do velké hloubky. Na jejich tvorbu má vliv řada faktorů, jako je teplota lití, složení formovací směsi, velikost zrn ostřiva, metalostatický tlak a další. Vznik této vady je názorně představen na následujícím obrázku (Obr. 7). Příkladem připečenin mohou být také části jader, formy, které tvoří vnitřní rohy nebo dutiny odlitku (Obr. 8). Na obrázku (Obr. 9) je možné vidět konkrétní odlitky postižené touto vadou. [21; 23; 24]



Obr. 7 Schéma vady „hluboká zapečenina“ [9].

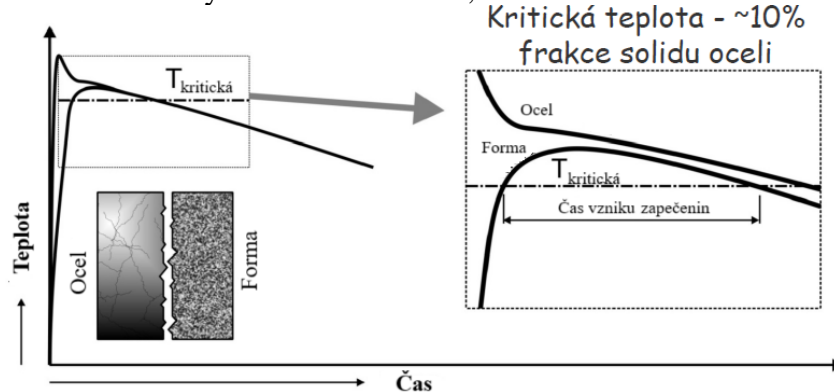


Obr. 8 Mikroskopický pohled na zapěčeninu v mezizrnovém prostoru formy [25].



Obr. 9 Vlevo je vyobrazeno pouzdro z LKG a vpravo těleso ložiska v řezu ze slitiny mědi [23].

Metodika predikce vzniku připečenin, zachycená na obrázku (Obr. 10), spočívá ve výpočtu času, kdy teplota na povrchu formy v určitém místě přesáhne $T_{krit.}$ (kritická teplota). Kritickou teplotu $T_{krit.}$ lze stanovit jako mezní hodnotu, při které dochází ke vzniku připečenin na povrchu formy. Doba, po kterou teplota tuto hodnotu překračuje, odpovídá časovému intervalu vzniku připečenin. Tento proces lze analyzovat pomocí numerických simulací, například metodou konečných prvků, které umožňují modelovat teplotní pole v čase. Simulace tak poskytují možnost určit, kdy a jak dlouho teplota na povrchu formy přesahuje kritickou hodnotu, a tím předpovědět vznik připečenin (viz Obr. 10). Tato metoda byla poprvé představena autory C. Beckermannem, B. E. Brooksem a V. L. Richardsem. [23]



Obr. 10 Příklad metodiky predikce vzniku zapěčenin [23].

2.2 Zkoušky připečenin

Zkoušky připečenin (povrchových či hlubokých) jsou nástrojem pro ověření, zvyšování jakosti a vývoj nové technologie. Především jsou určeny ke snížení vad a zajištění bezpečnosti a funkčnosti finálních produktů.

GERTSMANŮV ODLITEK

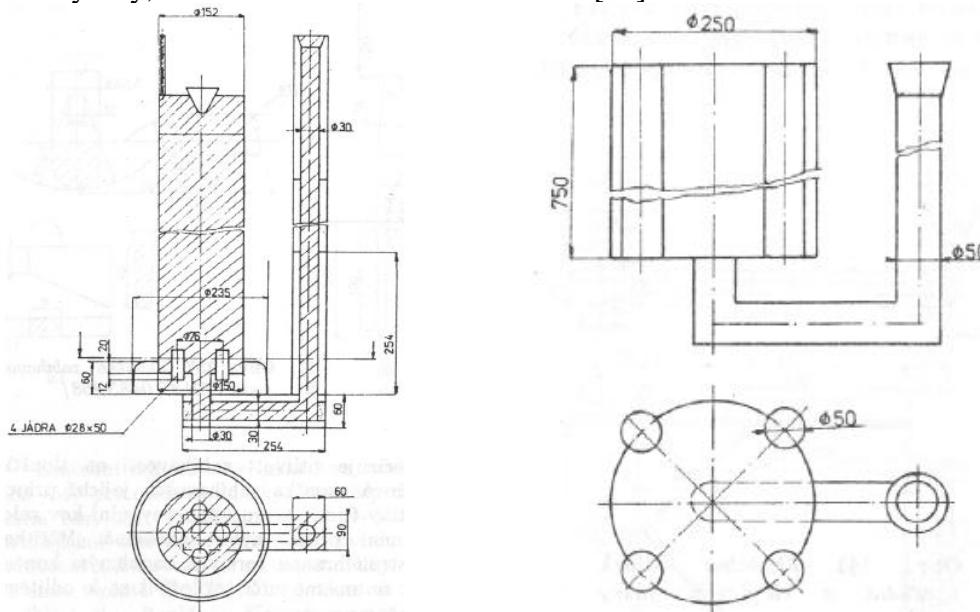
První výzkumy zaměřené na penetraci kovu byly prováděny kolem čtyřicátých let 20. století pomocí experimentů na zkušebních tělesech. Gertsmanova zkouška se zařazuje mezi nejnámější zkoušky umožňující zkoumání vlivu metalostatického tlaku kovu na písková jádra z různých formovacích materiálů a detailní sledování průniku kovu do jader. Také prověřuje vliv různorodých faktorů, které vedou ke vzniku povrchových vad, např. připáleniny u ocelových nebo litinových odlitků (Obr. 11 vlevo). Jedná se o plochý odlitek válcovitého tvaru. [11; 26; 27]

Přínos této metody spočívá zejména v diagnostice a prevenci vad odlitků, což vede ke zlepšení kvality výrobků a snížení výrobních nákladů. Metoda Gertsmanova zkušební vzorku, i přes její výhody při analýze připečenin a interakce kovů s formovacími směsmi, má i několik nevýhod, jako je např. časová náročnost na přípravu zkušební vzorku, náročnost hodnocení připečenin, omezená reprezentativnost zkušební tělesa atd. [27]

FURSUNDŮV ZKUŠEBNÍ ODLITEK

Forma měla tvar válce o průměru 250 mm a výšce 750 mm. Forma měla po obvodu čtyři známky uspořádané rovnoběžně s osou válce. Do známek patřila válcová jádra o výšce a průměru 50 mm, vyráběná na laboratorním pýchovacím stroji. Odlévá se vertikálně a vtok je umístěn uprostřed dna formy. Tímto uspořádáním byl ověřen vliv metalostatického tlaku na rozsah penetrace (Obr. 11 vpravo). [21; 27; 28]

Fursundův odlitek je využíván převážně u masivních ocelových odlitků, kde pomalé tuhnutí může vést k vnitřním i povrchovým defektům. K nevýhodám patří nákladnost výroby, časová náročnost výroby, testování zkušební odlitku atd. [27]



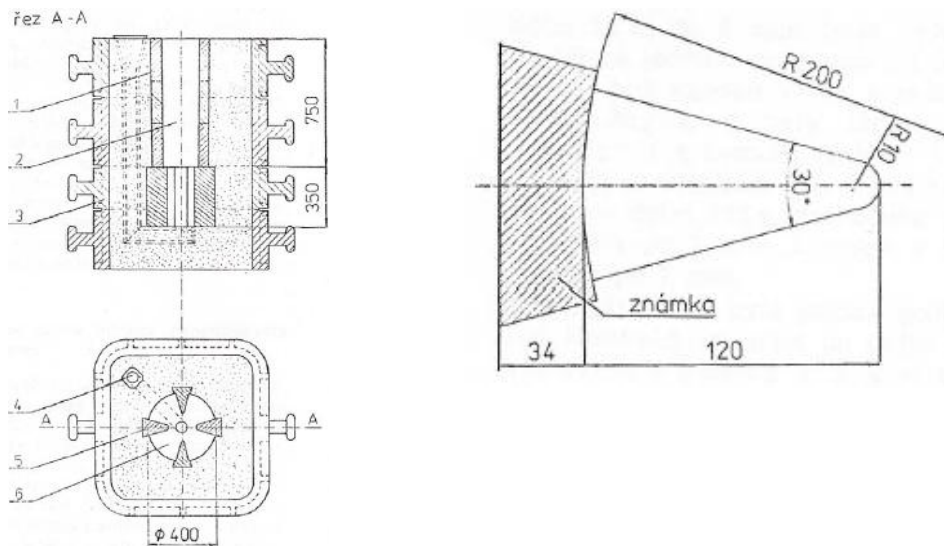
Obr. 11 Výkres zkušební odlitku podle Gertsmana a podle Fursunda [26].

ZKUŠEBNÍ ODLITEK PODLE JELÍNKA

V tomto případě byl navržen válcový odlitek o průměru 400 mm a výšce 350 mm (Obr. 12) obsahující čtyři jádra s klíny s vrcholovým úhlem 30°. Pro dosažení různých teplotních podmínek byla použita dvě klínová jádra s poloměrem zaoblení R10 a R20 (Obr. 12). [26; 28]

Z důvodu zvýšení metalostatického tlaku byl použit nálitok. Na odlévání zkušebních odlitků byla použita ocel, přičemž lití probíhalo směrem od spodní části až nahoru skrze vtokovou soustavu ze šamotových tvárnic. Po odlití a očištění byly odlitky rozřezány rovnoběžně se základnou uprostřed výšky jádra. Poté byla zapečená část jádra natřena roztokem síranu

měďnatého (CuSO_4), což napomohlo k vyloučení mědi a ke zjištění skutečné hloubky zapečeniny. Nakonec byla výsledná plocha zapečeniny vztažena k celkové ploše řezu skrz jádro. Výhody a nevýhody použití tohoto zkušební odlitku jsou stejné jako u předchozích zkušebních odlitků zmíněných výše. [27; 28]



Obr. 12 Vlevo výkres zkoušky podle Jelínka a vpravo řez zkušebním jádrem s poloměrem zaoblení R10 [11].

3 MECHANISMY PENETRACE KOVU

Penetrace může probíhat dle šesti hlavních mechanismů, které se navzájem mohou kombinovat. Hlavním mechanismem je mechanická penetrace, která se podle [29] podílí přibližně na 75 % výskytu připečenin. Druhé místo odpovídá chemické penetraci, odpovídající přibližně 20 % vad. Penetrace způsobená explozí vody, parami kovu, vycezováním a nakonec cristobalitickou expanzí zahrnuje přibližně okolo 5 % [29]. [9; 15]

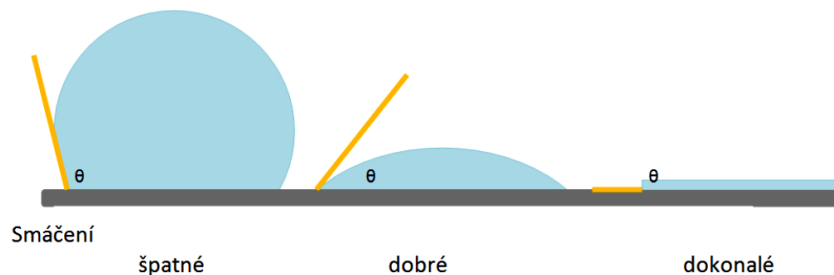
Studie zahrnují příčiny a parametry ovlivňující penetraci kovu do slévárenských pískových forem. Ke klíčovým mechanismům náleží:

- penetrace kovu přes tekutou fázi;
- penetrace prostřednictvím chemických reakcí;
- penetrace za spoluúčasti par kovu;
- penetrace iniciované cristobalitickou expanzí;
- penetrace způsobená explozí vody;
- penetrace vycezováním. [29]

3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)

Kov může pronikat do prostoru pórů ve směsi za působení metalostatického, metalodynamického tlaku nebo také tlakem v důsledku kapilárních sil formy. Penetrace může nastat, pokud je porušena rovnováha tlaků. To znamená, že tlak tekutého kovu přesáhne odpor kladený formou a kov pronikne mezi zrna ostřiva formovací směsi. [15; 30]

Podstatný vliv na penetraci kovu do směsi má také typ použité formovací směsi a její zhutnění. Teplota kovu, především jeho přehřátí, zásadně ovlivňuje úhel smáčení. S rostoucí teplotou kovu tento úhel rychle klesá a naopak. Chemické složení kovu může úhel smáčení ovlivnit buď pozitivně (zvýšení úhlu: Si), nebo negativně (snížení úhlu: C, Mn, S), viz obrázek (Obr. 13). [9; 30]



Obr. 13 Význam úhlu smáčení [31].

Rovnice (3.1) popisuje rovnováhu mezi tlaky, které působí na formovací směs (levá strana), a tlaky bránící pronikání kovu (pravá strana).

$$P_{\text{met}} + P_{\text{dyn}} + P_{\text{exp}} = P_{\gamma} + P_f + P_{\text{gas}} \quad (3.1)$$

Kde:

P_{met} metalostatický tlak je vyvolaný hmotností roztaveného kovu [Pa]
na formu během lití (dle vzorce $p = \rho * g * h$)

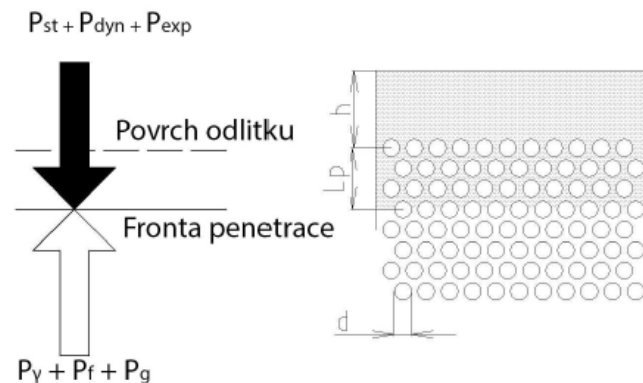
P_{dyn} dynamický tlak, který je součástí tlaku tekutiny a vzniká pomocí [Pa]
jejího pohybu (dle vzorce $q = \frac{1}{2} * \rho * v^2$)

P_{exp} plyn ve formě, kde plyn mění svůj objem (dle vzorce $p * V =$ [Pa]
 $n * R * T$)

P_Y	kapilární tlak, který určuje rovnováhu mezi povrchovými a objemovými silami a je vyvolaný povrchovým napětím na zakřiveném povrchu kapaliny (dle vzorce $p = \frac{2\sigma}{r}$)	[Pa]
P_f	tlak od plynů formy	[Pa]
P_{gas}	ztráta tlaku vlivem tření mezi kovem a formou	[Pa]

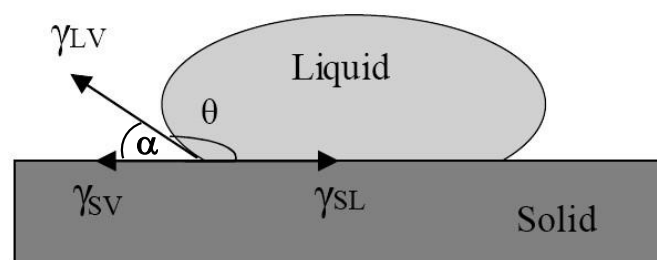
Na levé straně rovnice (3.1) jsou uvedeny tlaky v tekutém kovu, jako je statický a dynamický tlak. Tyto dva tlaky působí ve směru pronikání kovu do formy. V případě litin je také přítomen tzv. expanzní tlak, který je způsobený grafitickou expanzí. [4; 9; 15]

Na pravé straně rovnice (3.1) se nacházejí síly zabraňující pronikání kovu do formovací směsi, přičemž má nejdůležitější roli kapilární tlak. Kapilární tlak je závislý na úhlu smáčení, povrchovém napětí kovu a nakonec na velikosti pórů formy, zároveň může podporovat nebo dokonce bránit pronikání kovu v závislosti na chemickém působení mezi kovem a formou. Penetrace kovu do formy nastane v případě, kdy je pravá strana rovnice větší než strana levá. Interakce tlaků na rozhraní kov/forma je zachycena na obrázku (Obr. 14). [11; 30; 32]



Obr. 14 Ukázka principu porušení tlakové rovnováhy na rozhraní mezi kovem a formou [9].

Schematické znázornění úhlu smáčení θ a povrchového napětí mezi taveninou a povrchem formy γ_{LV} je uvedeno na obrázku (Obr. 15).



$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cdot \cos(\alpha) \quad \alpha = 180^\circ - \theta$$

Obr. 15 Princip měření povrchového napětí metodou ležící kapky [31].

Jestliže je úhel smáčení θ větší než 90° , kapilární tlak brání pronikání kovu do formy, jinak řečeno forma je nesmáčivá (metalofobní), tzn. kapalina na povrchu tuhého tělesa vytvoří kapku. V případě, že dochází k chemickým reakcím mezi kovem a formou (jako např. v prostředí oxidační atmosféry), úhel smáčení se zmenšuje. Zároveň je kov přitahován do pórů a tím pádem se kapilární tlak stane negativním a povrch je označován za smáčivý (metalofilní). V případě, kdy je do kapaliny zavedena kapilární trubice, tzv. úhel smáčení se nerovná 90° , kapalina je po stěnách nasávána do kapiláry a její hladina je

konvexního tvaru (Obr. 13 vlevo). Naopak metalofobní kapalina bude konkávního tvaru (Obr. 13 uprostřed) z důvodu odpuzování kapaliny ven z kapiláry. [4; 11; 30]

Složky (3.1) nacházející se na pravé straně rovnice (P_Y , P_f , P_{gas}) mají na smáčitelnost formy zanedbatelný vliv. Např. během měření tlaku plynů P_{gas} ve formách z různorodých směsí se dosahovalo hodnot okolo 1–1,25 atm. Třecí odpor P_f závisí na délce trvání penetrace, viskozitě taveniny a rychlosti proudění. [9]

Rovnice (3.2) vyjadřuje rovnováhu mezi třemi mezifázovými rozhraními a povrchovým napětím [32; 33].

$$\gamma_{LV} * \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (3.2)$$

kde:

γ_{LV}	napětí mezi taveninou a plynem	$[N*m^{-1}]$
γ_{SV}	napětí mezi formou a plynem	$[N*m^{-1}]$
γ_{SL}	napětí mezi taveninou a formou	$[N*m^{-1}]$
θ	úhel smáčení	$[^\circ]$

Úhel smáčení θ lze vyjádřit podle [33] jako funkci chemického složení a teploty kovu dle rovnice (3.3). [33]

$$\theta_A = 292,837 + A * [\% C] + B * [\% Si] + C * [\% S] + D * [\% Mn] + E * [\% P] + F * T + G * [\% C] * [\% Si] + H [\% C] * T + I * [\% Si] * [\% S] + J * [\% S] * T + K * [\% Mn] * [\% P] = [^\circ] \quad (3.3)$$

Kde se do předchozí rovnice (3.3) dosadí následující hodnoty z tabulky (Tab. 2):

Tab. 2 Hodnoty konstant rovnice (3.3) [33].

Konstanta [-]	Obsah [% prvku]	Konstanta [-]	Obsah [% prvku]
A	-45,159	G	31,13
B	-106,34	H	-0,118
C	-343,401	I	96,114
D	-18,527	J	0,544
E	-36,678	K	129,745
F	0,341		

Po dosazení uvedených konstant se obdrží následující rovnice:

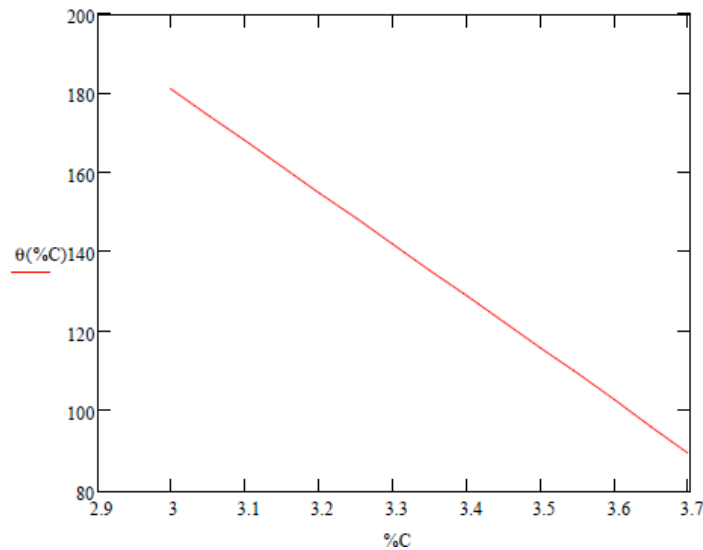
$$\theta_A = 292,837 - 45,159 * [\% C] - 106,134 * [\% Si] - 343,401 * [\% S] - 18,527 * [\% Mn] - 36,678 * [\% P] + 0,341 * T + 31,813 * [\% C * \% Si] - 0,118 * [\% C * T] + 96,114 * [\% Si * \% S] + 0,544 * [\% S * T] + 129,745 * [\% Mn * \% P] = [^\circ] \quad (3.4)$$

Výpočet rovnice (3.4) je upřesněn na dané chemické složení v podkapitole (6 Experimentální část). Počáteční podmínky pro výpočet (3.3) a (3.4) se nachází v následující tabulce (Tab. 3).

Tab. 3 Počáteční podmínky pro rovnice (3.3) a (3.4) dle tabulky (Tab. 2) [33].

Počáteční podmínka [-]	Hodnota [% prvku]	Počáteční podmínka [-]	Hodnota [% prvku]
% C	3,3–3,7	% P	0,11
% Si	2,3	% S	0,12
% Mn	0,63	T	1380 °C

Výsledkem rovnice (3.4) je obrázek (Obr. 16), kde je vidět pokles úhlu smáčení θ se vzrůstajícím množstvím C v tavenině pro teplotu kovu 1350 °C. [32; 33]


 Obr. 16 Graf vlivu chemického složení litiny na úhel smáčení θ [32].

Zda bude probíhat penetrace, rozhoduje tzv. PI, penetrační index (3.5), který je závislý na kritickém úhlu smáčení θ_{kr} (3.6), jenž stanoví podmínky, za kterých bude mechanická penetrace probíhat. Výpočet je upřesněn v podkapitole (6 Experimentální část). Pokud je penetrační index > 1 , penetrace je nepravděpodobná. Naopak pokud je penetrační index < 1 , může vzniknout mechanická penetrace. Dále se tento kritický úhel smáčení porovná se skutečným úhlem θ_A . Skutečný úhel je měřen mezi roztavenou slitinou a substrátem (formou). [15]

$$PI = \frac{\theta_A}{\theta_{kr}} = [-] \quad (3.5)$$

kde:

θ_A skutečný úhel smáčení [výpočet dle rovnice (3.4)] [°]

θ_{kr} kritický úhel smáčení [výpočet dle rovnice (3.6)] [°]

$$\theta_{kr} = \cos^{-1} * \left[-\frac{d_p}{4\gamma_{LV}} (\rho gh + \rho v^2) \right] = [^\circ] \quad (3.6)$$

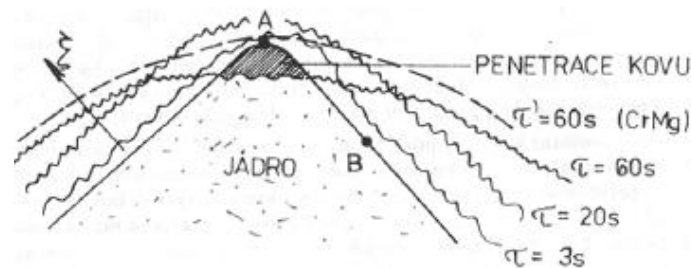
kde:

d_p	průměr pórů mezery mezi pískovými zrny	[m]
γ_{LV}	povrchová energie par slitiny	[J * m ⁻²]
h	metalostatická výška	[m]
ρ	hustota slitiny	[kg*m ⁻³]
g	gravitační konstanta	[m*s ⁻²]
v	vstupní rychlost kovu do formy	[m*s ⁻¹]

Proces pronikání kovu do pórů formy probíhá podle [9; 11] spíše skokově. Kov nejprve pronikne do pórů formy, kde kompletně ztuhne, což vede ke zvýšení tepelné vodivosti vzniklé zapečeniny. A ta absorbuje tzv. latentní teplo krystalizace, které ohřívá formu umožňující opětovné roztavení kovu a opětovné proniknutí do hloubky. Tyto skoky se s časem zkracují. [9; 11]

Proces se komplikuje u pravých jader nebo vystouplých částí formy, zkrátka tam, kde dochází k opakovanému tavení a tuhnutí kovu. Tím vznikají příznivé podmínky pro vznik hlubších připečenin. Schopnost akumulovat teplo formy ovlivňuje rychlost a hloubku prohřátí jádra, přičemž používání jader s vysokou tepelnou kapacitou může v určitých případech zabránit roztavení kůry odlitku a posléze i penetraci kovu. [4; 11]

Na obrázku (Obr. 17) je zachycen případ, kdy se kov odlévá s přehřátím, čímž i po naplnění formy kovem zůstává kov po nějaké době stále v tekutém stavu při kontaktu s formou. [15; 27]



Obr. 17 Schéma natuhávání kovu na klínovém jádře [11].

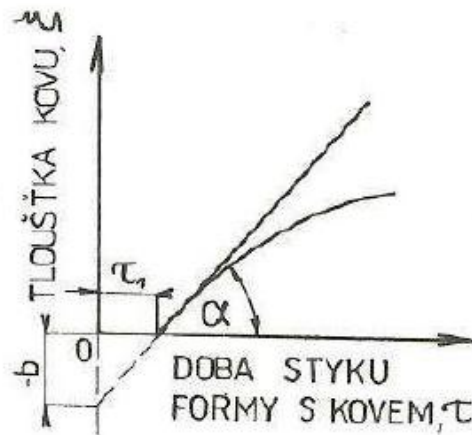
Natuhávání kovu v bodě B, kde jádro odvádí předávané teplo, probíhá podle Schwarzova vztahu [9; 11; 15]:

$$\xi = -b + k * \sqrt{\tau} = [\text{mm}] \quad (3.7)$$

kde:

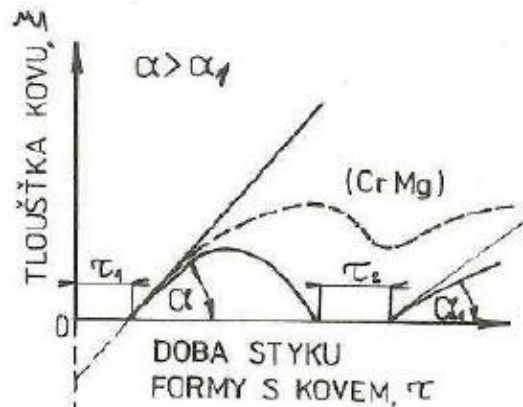
ξ	úsek na ose y, který odpovídá tloušťce natuhlé vrstvy (Obr. 17)	[mm]
b	úsek, který se nachází na ose tloušťky natuhlé vrstvy ξ (Obr. 17)	[mm]
k	konstanta tuhnutí	[m * s ^{-1/2}]
τ	doba tuhnutí	[s]

Souvislé tuhnutí vrstvy ξ v bodě B (3.7) probíhá podobně jako na povrchu formy ve tvaru desky. Během kritického časového intervalu τ_1 je tekutý kov v kontaktu s chladnějším jádrem, což může zapříčinit vznik penetrace (Obr. 18). [11; 19]



Obr. 18 Repräsentace tuhnutí kovu v bodě B [9].

Tuhnutí kovu v bodě A se liší od ostatních míst kvůli specifickým tepelným podmínkám. Nejprve dochází k rychlému natuhávání kůry kovu, následně je tento proces zpomalen z důvodu prohřívání formy a jádra z obou stran. Pomocí nerovnováhy mezi přívodem a odvodem tepla teplota v bodě A stoupne nad teplotu pseudoisolidu (pseudoisolid je termín popisující přechodový stav mezi fázemi v pevné a tekuté formě, kde povrch tuhne kovu dosahuje určité teploty), což vede k roztavení kovu (Obr. 19). Tento stav je označován jako časový úsek τ_2 , během kterého se špička opět obnoví. Další tuhnutí je o něco pomalejší ($\alpha_1 < \alpha$) a vede k cyklickému natuhávání, které je více nebezpečné, než to bylo v případě prvního styku kovu s jádrem, protože jádro má vyšší teplotu. [9; 11]



Obr. 19 Repräsentace tuhnutí kovu v bodě A [11].

Jak moc hluboko a rychle se jádro prohřeje, z velké části určuje koeficient tepelné akumulace b_f . Lze použít některá opatření, aby se zamezilo nežádoucím efektům. Je možné využít formovací směsi s vysokou schopností ochlazení, např. zirkon, korund, kovové ostřívo nebo také chrommagnezit. Tato ostřiva zabraňují penetraci tím, že neumožní roztavení prvotní kůry za stejných podmínek lití. [11; 19]

V publikaci [32] je uvedena tabulka s faktory ovlivňujícími průběh mechanické penetrace (viz Tab. 4).

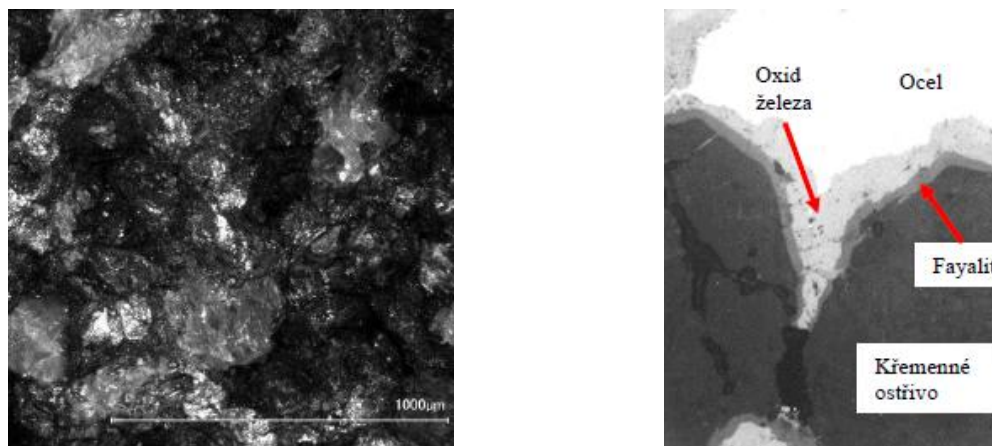
Tab. 4 Přehled faktorů ovlivňujících mechanickou penetraci [32].

Zvýšení faktoru zvyšuje sklon k penetraci	Zvýšení faktoru snižuje sklon k penetraci
metalostatický tlak	napětí (povrchová energie)
dynamický tlak	úhel smáčení mezi kovem a formovací směsí
velikost zrn směsi (prodyšnost, hustota směsi)	nátěry
licí teplota	upěchování formovací/jádrové směsi

3.2 Penetrace prostřednictvím chemických reakcí (chemická penetrace)

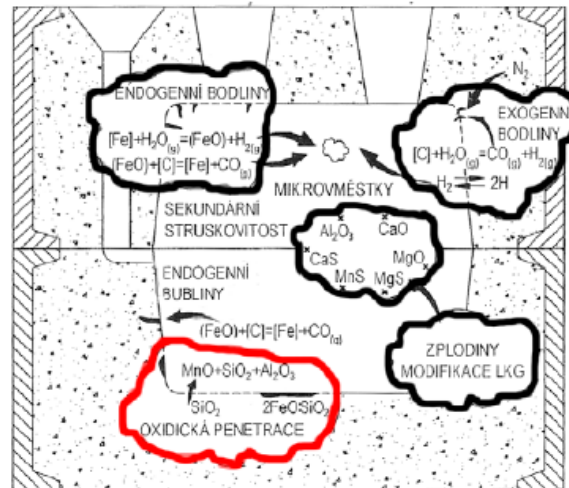
Chemická penetrace nastává, když tavenina kovu pronikne do formovací směsi prostřednictvím chemických reakcí mezi kovem, atmosférou a ostřivem. Tyto zmíněné reakce mohou podporovat vstup tekutého kovu do formy nebo pronikání produktů těchto reakcí. Oxidující atmosféra je důležitá především u slitin železa, kde oxidace kovu podporuje reakce s kyslíkem a má za příčinu převážnou většinu vad odlitků (Obr. 20). Procesy chemické penetrace jsou složitější oproti mechanické penetraci [viz podkapitola 3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)], což závisí na mnoha faktorech, jako je např. složení formovací směsi nebo také chemické složení taveniny. [4; 9; 15]

Na obrázku (Obr. 20 vlevo) jsou vidět částečně zapečená a roztavená zrna křemenného ostřiva. Na obrázku vpravo (Obr. 20) je zachycen příklad chemické penetrace ocelového odlitku zhotoveného do křemenné slévárenské formy. [34; 35]



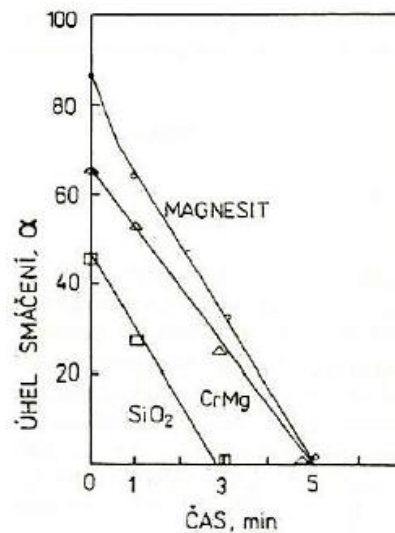
Obr. 20 Chemická penetrace křemenného ostřiva [34; 35].

Při výrobě odlitků a odlévání na vzduchu dochází k tzv. reoxidaci, která způsobuje vznik tekutých, plyných a také pevných produktů. Tyto zmíněné produkty mohou reagovat s formou a podporovat vznik povrchových, ale i vnitřních vad (Obr. 21). V některých případech vznikají sloučeniny s nízkým bodem tavení. Příkladem je fayalit, který podporuje penetraci kovu do formovací směsi převážně za vyšších teplot. Tento typ penetrace je častější u ostřiva obsahujícího křemen nebo živce. U slitin je za reaktivní prvek považován mangan, protože se jedná o zásaditý prvek, který reaguje s kyselým prostředím. [9; 14; 35]



Obr. 21 Příklad reoxidačních procesů ve slévárenské formě a jejich vliv ve formě [9].

Oxidy z velké části zůstávají na povrchu kovu a částečně se přesouvají do formy. Tzv. oxidické pleny snižují úhel smáčení a zároveň zvyšují smáčivost formy kovem. Po několika minutách se krajní úhel smáčení (θ) blíží k nule, a to u všech typů formovacích směsí (kyselé, zásadité a neutrální). Proto je kov při nízkém θ již nasáván do mezizrnových prostorů (Obr. 22). [4; 11; 27]



Obr. 22 Změna úhlu smáčení s dobou styku odlitku s formou [11].

Jakmile ocel nebo litina vstoupí do pískové formy, teplo jde do formy, kde dochází k rozpínání vzduchu mezi zrný písků. V případě syrové formy (např. bentonitová směs) se volná voda postupně odpařuje, což vede k vysušení oblasti, která je v přímém kontaktu s kovem. Kyslík, vzniklý z vodní páry, může reagovat s uhlíkem, železem nebo s dalšími prvky v litině. Jak už bylo v této podkapitole zmíněno, oxidace prvků probíhá podle jejich afinity a aktivity ke kyslíku v následujícím pořadí: mangan, křemík a uhlík. To je určováno hodnotou záporné volné entalpie vyjadřující stabilitu oxidu. Čím zápornější je hodnota Gibbsovy energie za tvorby oxidu, tím se stane stabilnějším. Ta je vyjádřena následujícím vztahem (3.8): [9; 32; 34]

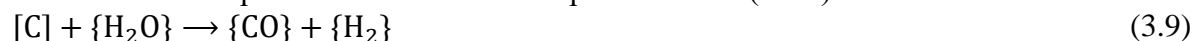
$$\mathcal{A} = -\Delta G = -(\Delta H - T * \Delta S) = [J * mol^{-1}] \quad (3.8)$$

kde:

\mathcal{A}	afinita	$[J * mol^{-1}]$
ΔG	Gibbsova energie	$[J * mol^{-1}]$
ΔH	reakční teplo	$[J * mol^{-1}]$
T	teplota	[K]
ΔS	změna entropie	$[J * mol^{-1}]$

Při odlévání litin (oceli) do syrových forem, převážně bentonitových, dochází podle [32; 34] ke vzniku následujících reakcí oxidické penetrace:

- reakce rozpuštěného uhlíku s vodní párou v litině (oceli):



- reakce vodní páry s uhlíkem obsaženým v uhlíkatých materiálech (jako je kamenouhelná moučka):



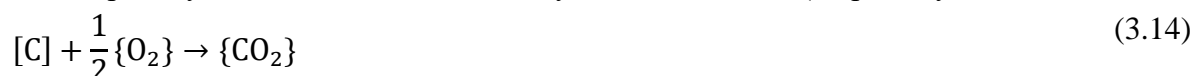
- oxid uhelnatý, který vznikl z předešlé reakce, může reagovat s vodní párou:



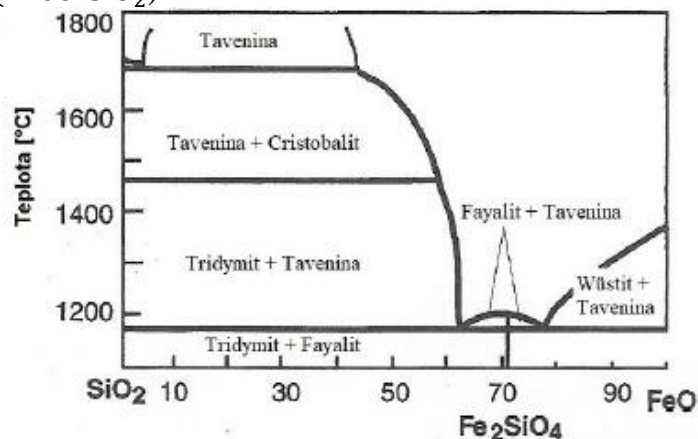
- železo může být oxidováno na rozhraní kov/forma oxidem uhličitým nebo vodou:



- u forem z pryskyřice, které mají nízkou relativní vlhkost a neobsahují uhlíkaté přísady, může nastat reakce mezi kyslíkem a uhlíkem (rozpuštěný v kovu):

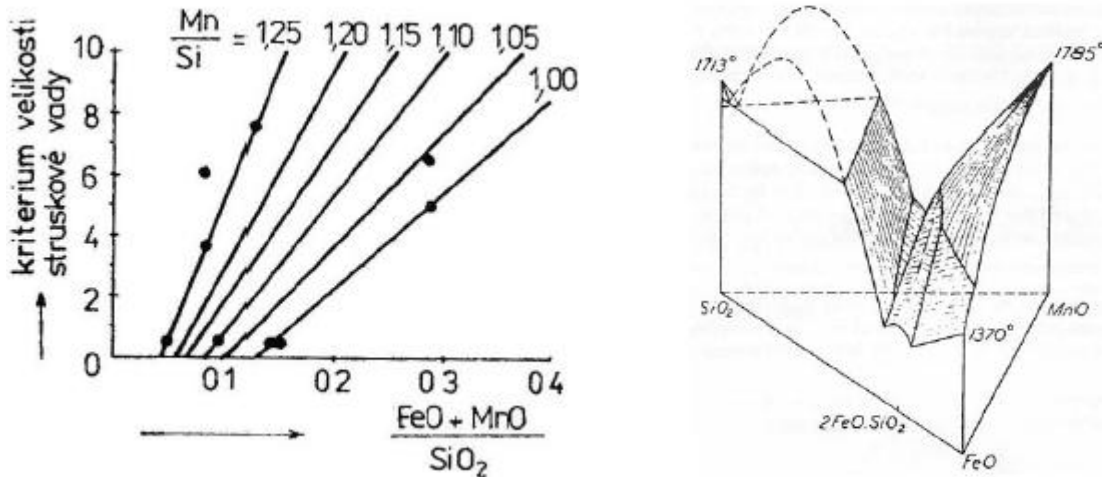


Z uvedených rovnic vyplývá, že hlavními produkty jsou vodík, oxid uhelnatý a oxid uhličitý. Tyto plyny mohou reagovat s litinou (ocelí) dle reakce (3.11) a následně tvořit oxid železnatý. Oxid železnatý může reagovat s křemičitým pískem podle reakce (3.15), čímž vzniká nízkotavitelný křemičitan, např. fayalit s bodem tání 1205 °C (Obr. 23). Při teplotách mezi přibližně 870 °C a 1470 °C vzniká tridymit a při teplotách nad 1470 °C cristobalit a tavenina. Tridymit a cristobalit jsou vysokoteplotní polymorfy oxidu křemičitého (SiO₂), které ovlivňují taveninu nepřímo, především během ochlazování a tuhnutí tím, že mění viskozitu, krystalizaci, mechanické vlastnosti a tepelné chování materiálu. [32; 34]



Obr. 23 Rovnovážný diagram SiO₂ – FeO [36].

V mnoha odborných studiích se uvádí, že hloubka penetrace závisí na obsahu kyslíku a manganu. Se zvyšujícím obsahem těchto prvků hloubka penetrace roste. Při vyšším obsahu manganu (charakterizován poměrem Mn/Si) dochází ke vzniku komplexních sloučenin, viz ternární diagram FeO – SiO₂ – MnO na obrázku (Obr. 24 vpravo). Na obrázku (Obr. 24 vlevo) se nachází diagram ukazující závislost struskových vad u litinových (ocelových) výrobků a poměr obsahu Mn/Si. Komplexní sloučeniny tohoto typu smáčí formu a mění povrchovou energii křemenného ostříva v průběhu proniknutí nízkotavitelných křemičitanů do formy. [34; 37]



Obr. 24 Diagram ukazující závislost struskových vad a ternární diagram FeO – SiO₂ – MnO [11; 34].

3.3 Penetrace za spoluúčasti par kovu

Tento typ penetrace vzniká v místech, kde se dlouhodobě udržuje vysoká teplota, např. v tepelných uzlech nebo tlustostěnných odlitcích. Ačkoli jde o malé množství kovu, může dojít k pokovování povrchu jednotlivých zrn, což vede k následnému zmenšení úhlu smáčivosti a kov snadněji proniká do pórů formy. [38]

Poprvé předložil myšlenku průniku kovu ve formě par Jones v roce 1948 [9]. Navrhl, že kovové páry mohou difundovat do formy neboli také do jádra, kde následně probíhá kondenzace. Zjistil, že ihned po odlití kovu do formy se na povrchu odlitku vytvoří pevná, ale hladká kůra a k penetraci nedochází. Naopak při běžném chladnutí se na odlitku objevují zapečeniny, což Jonese vedlo k závěru, že pronikání kovu probíhá prostřednictvím par horkého kovu. [4; 9]

Další výzkum této problematiky přinesl Sanders [15]. Přišel s teorií vzniku zapečenin na základě tvorby plynného pentakarbonylu železa (Fe(CO)₅). Na rozhraní kov/forma se plyn rozkládá na železo a oxid uhelnatý (CO), zároveň je tento proces doprovázený dalšími chemickými reakcemi vedoucími ke vzniku fayalitu s nízkou teplotou tavení. Kohlmeyer [15] doplnil teorii o možnost přenosu kovu pomocí monokarbonylu železa [Fe(CO)], avšak potřebné vysoké tlaky k přenosu kovu pro tvorbu karbonylů nejsou ve slévárenské formě dosažitelné. [15; 32; 38]

Svoboda [15] rozpracoval nejpravděpodobnější teorii týkající se penetrace kovu, ta je zároveň nejnovější. Svoboda zkoumal vznik zapečenin u běžných odlitků. Jeho výzkum odhalil vysokou koncentraci manganu v hlubších místech formy (70 % Fe a 30 % Mn), což je pravděpodobně způsobeno jeho vysokou rychlostí vypařování. Vysoká koncentrace manganu může být vysvětlena vysokou rychlostí, kterou se vypařuje. Zároveň byla vysoká koncentrace síry vysvětlena pomocí tlaků páry, které jsou mnohonásobně nižší než u manganu. Naopak nízký obsah uhlíku může být vysvětlen jeho zanedbatelně nízkým tlakem par během teploty

1600 °C. Při takových pokusech byly vzorky formy umístěny nad lázní tekutého kovu bez přímého kontaktu s kovem a bylo prokázáno pronikání kovových par směrem do formovacího materiálu. Páry obsahovaly oxidy [(FeO₂) a (MnO₂)] a rychlost jejich vypařování byla řízena parciálním tlakem kyslíku. Změna formovacího materiálu neměla vliv na průběh difuze, která byla ovlivněna především velikostí pórů v materiálu. Svoboda na základě svých experimentů formuloval mechanismus penetrace: Kov proniká ve formě par vznikajících na rozhraní kov/forma a difundujících do formy, tam následně dojde ke kondenzaci. Proces je urychlen zejména v případech, kdy pára prvků obsahuje prvky s vysokou těkavostí, jako je např. mangan. Poté na zrnech formovací směsi vzniká tenká vrstva kovu měnící charakteristiky povrchu ostřiva a umožňující průnik kovu zahřátého na teplotu likvidu. Dále také mění tepelné vlastnosti formy, čímž se usnadňuje sálání tepla skrze formu a zvyšuje teplotu hlouběji ve vrstvách formy, což má za následek hlubší penetraci kovu do formy. [9; 13; 26; 27; 29]

3.4 Penetrace způsobená výronky kovu do jader pomocí cristobalitické expanze

Mechanismus cristobalitické expanze byl pozorován u směsi s vodním sklem, jak uvádějí autoři výzkumů ve svých dílech [26; 39]. Vznik tohoto typu penetrace souvisí s jevem zvaným cristobalitická expanze jader. Křemenné ostřivo, především α – SiO₂, které má vysokou čistotu, prochází pomalou a nevratnou přeměnou na nízkotavitelný cristobalit v intervalu teplot mezi 900 a 1100 °C. Během této přeměny α – SiO₂ na cristobalit dochází ke změně krystalové mřížky, a sice z hexagonální mřížky HCP (hexagonal close packed) na krychlovou BCC (body centred cubic) [40], což se zařazuje mezi tzv. pozvolné přeměny. Tento proces probíhá pomalu, zejména pokud je přítomen chemicky čistý křemen. Ten je hrubě krystalický a ve své krystalické mřížce obsahuje málo defektů. Rovnovážná teplota přeměny (900 a 1100 °C) také vede k nárůstu objemu jader až o 15,7 %. Proces cristobalitizace je významně urychlován přítomností kationtů, a proto je pravděpodobnější, že k němu dojde u směsi na bázi vodního skla. Kationty jsou v následujícím pořadí, např. Zn²⁺ výrazně urychlují cristobalitizaci oproti Mg²⁺ [9; 26; 39]:

- K⁺ > Na⁺ > Li⁺
- Zn²⁺ > Mn, Fe²⁺ > Ba²⁺ > Sr²⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺

Pokud je mineralizátor přítomen v kapalné fázi, proces probíhá rychleji. Je to z důvodu zvětšení kontaktu s povrchem křemenných zrn, což způsobí zrychlení celého procesu. Naopak kationty tvořící komplexotvorné kationty, jako jsou Al³⁺, B³⁺, P⁵⁺, Fe²⁺, cristobalitickou reakci zpomalují. Bez přítomnosti mineralizátorů probíhá proces velmi pomalu, přičemž dochází ke vzniku cristobalitu s defektní strukturou. [9; 27]

Cristobalit může za expanzi jader. Tento proces závisí na chemickém složení směsi, jemnosti, čistotě ostřiva a nakonec na teplotních podmínkách na rozhraní mezi jádrem a kovem. Objemové změny jader závisí na tepelném namáhání jader (ψ) a vyjadřuje je vzájemný vztah mezi odlítkem a jádrem. Pro vyjádření stupně tepelného namáhání jádra se používá rovnice (3.16). [26; 39]

$$\psi = \frac{R_1}{R_2} = [-] \quad (3.16)$$

kde:

$$R_1 = \frac{V_1}{S_1} \quad \text{relativní tloušťka odlitku} \quad [\text{mm}]$$

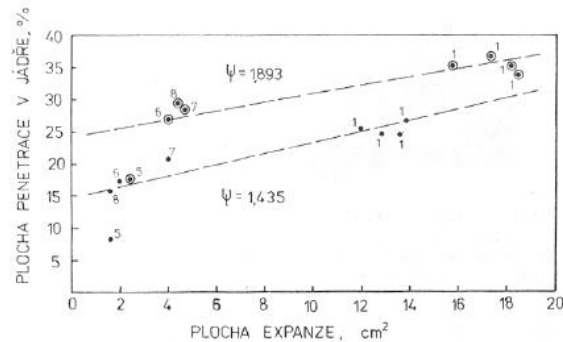
$$V_1 \quad \text{objem odlitku, zejména jeho tepelný obsah} \quad [\text{mm}^3]$$

$$S_1 \quad \text{povrch odlitku, zejména odvod tepla při ochlazování} \quad [\text{mm}^2]$$

$$R_2 \quad \text{relativní tloušťka jádra} \quad [\text{mm}]$$

První ztuhlá vrstva odlitku může znovu roztát při vysoké hodnotě ψ . To umožňuje pokračování expanze až do té doby, kdy vrstva znovu natuhne, aby dosáhla dostatečné pevnosti. Jádro nemůže nadále expandovat, avšak cristobalitická expanze uvnitř jádra nadále pokračuje. Je-li hodnota ψ nízká, ale cristobalitizace proběhne, k žádným objemovým změnám ani trhlinám nedochází. [9; 26; 33; 39]

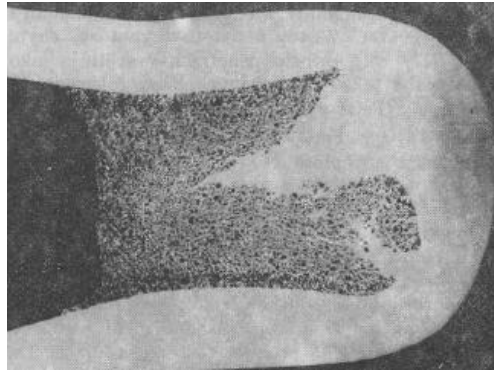
S rostoucí cristobalitickou expanzí mají směsi tendenci k tvorbě hlubších připečenin při vzrůstajícím ψ . Expanzi cristobalitu nedokážou zamezit nátěry ani maziva. Může též vznikat i vada tzv. výronky, kde kov proniká hlouběji do formovací směsi (viz Obr. 25). Další formou pronikání je cristobalitická expanze křemenného ostřiva. [4; 8; 9; 39]



- 1 – křemenný písek + vodní sklo
 5 – křemenný písek + vodní sklo + okuje
 6 – křemenný písek + vodní sklo + bauxit
 7 – křemenný písek + vodní sklo + FeCr struska
 8 – křemenný písek + vodní sklo
- Způsob vytváření jader:
 1, 5, 6 – CO₂ proces
 7 – samotvrdnoucí směs
 8 – zpevněná samotvrdnoucí směs
- $$\psi = \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{tepelné namáhání jádra})$$
- R_1 – relativní tloušťka odlitku (nebo jeho částí)
 R_2 – relativní tloušťka jádra

Obr. 25 Penetrace v litině a její vliv na jádra z vodního skla s rozdílným tepelným namáháním [26].

Expanze je obzvláště problematická v případě velkého tepelného namáhání formovací směsi, především jader. Důsledkem procesu je praskání nátěrů a povrchu formovací směsi, což má za následek pronikání kovu a následné prohřívání směsi. To může dále vést ke zvětšení rozsahu a narušování povrchu. Tento proces může vést k hlubokým zapečeninám a místnímu pronikání kovu ve formě, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 26). Přičemž když nedojde k dalším reakcím kovu s ostřivem, zapečeniny lze od povrchu odlitku snadno odstranit. Dojde-li k opačnému výsledku, zapečeniny jsou od povrchu odlitku těžko odstranitelné. [26]

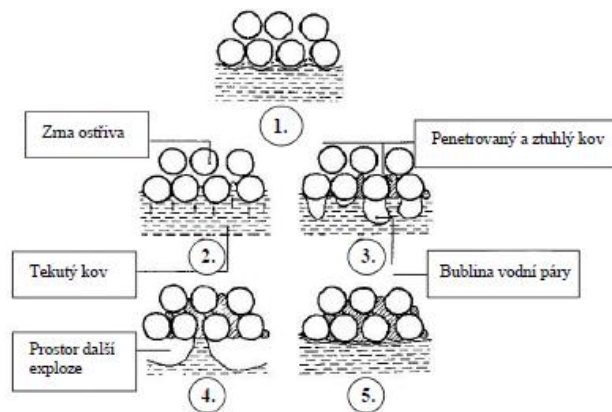


Obr. 26 Příklad výronku kovu představující hlubokou přípečeninu [26].

3.5 Penetrace způsobená explozí vody (explozivní penetrace)

Explozivní penetrace představuje specifický typ penetrace vyskytující se zásadně u bentonitových směsí a je charakterizována dynamickým chováním během odlévání kovu. Tento typ penetrace není zahrnutý do běžného vzorce pro mechanickou penetraci [viz podkapitola 3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)]. Nicméně tento jev je považován za jeden z typů mechanické penetrace, vyžadující zohlednění při analýze vad odlitků. [11; 29]

Základní princip explozivní penetrace spočívá v rychlém odpaření vody a tvorbě plynů během termodestrukce pojiv při přímém kontaktu tekutého kovu s formou, zejména v případě nízké prodyšnosti formovací směsi. Expandující plyny nemohou jednoduše uniknout skrz směs, proto pronikají do prostoru formy s kovem. Kov proniká do pórů formy a zároveň se bubliny plynu vtlačují do kovu. Poté tyto plynové bubliny explodují a následně je kov vtlačován mechanismem exploze hlouběji do mezizrnových prostor formy. Mechanismus explozivní penetrace je zachycen na obrázku (Obr. 27). [11; 29; 38]



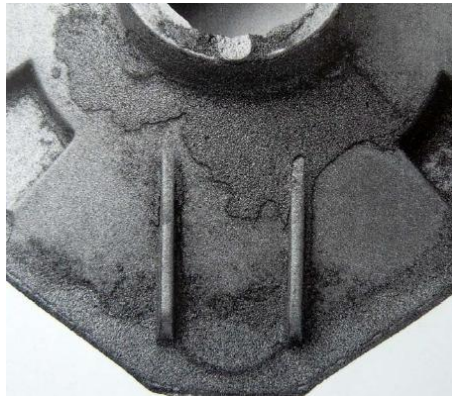
Obr. 27 Mechanismus penetrace způsobené explozí vody [38].

Tento proces může ještě více zesílit prvotními explozemi na povrchu formy, které rozrušují předem vytvořenou kůru na povrchu odlitku. To má za následek delší dobu kontaktu kovu s formou a tím dochází ke zvýšení hloubky penetrace. Ke konci procesu lití mohou exploze vznikat v horních částech formy, jakmile se v tomto místě nahromadí plyny a nemohou uniknout zejména kvůli nedostatečné prodyšnosti formy. Exploze můžou vytvořit oxidační atmosféru způsobující oxidaci kovu na povrchu formy nebo uvnitř mezizrnových prostor, což může podpořit vznik chemické penetrace. [9; 11; 41]

Explozivní penetrace se v nejčastějších případech vyskytuje u forem, které jsou moc upěchované, což vede k nižší prodyšnosti formy. Též se ztěžuje únik plynů, což vytváří podmínky pro vznik explozí. K explozivní penetraci nejčastěji dochází

v oblastech, kde probíhá rychlé zaplnění formy tekutým kovem. Nejčastějším znakem tohoto typu penetrace je ostře ohraničená penetrovaná plocha na povrchu odlitku. Studie prokazují, že mezi odlitkem a penetrovanou vrstvou se nachází pouze minimální propojení, což umožňuje snadné odloupení této vrstvy. [4; 9; 11; 41]

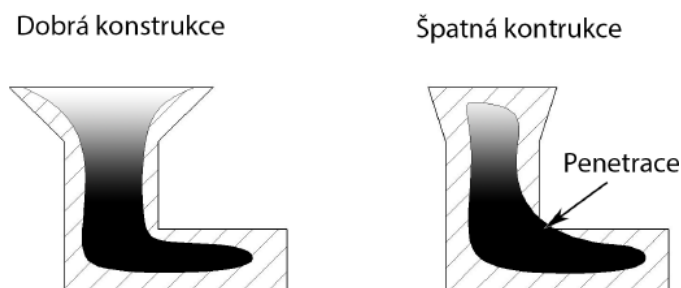
K explozivní penetraci může docházet nejen kvůli odpaření vody, ale i přítomností těkavých látek, které se mohou hromadit uvnitř formy v průběhu lití. Tento jev je známý v českých slévárnách, kde byly zaznamenány podobné exploze v důsledku uzavření jiných výbušných látek (např. BTEX látky) a jejich nahromadění. Příklad explozivní penetrace je uveden na obrázku (Obr. 28). [38; 41]



Obr. 28 Příklad explozivní penetrace po celé ploše odlitku [41].

3.6 Penetrace vycezováním (expanzní penetrace)

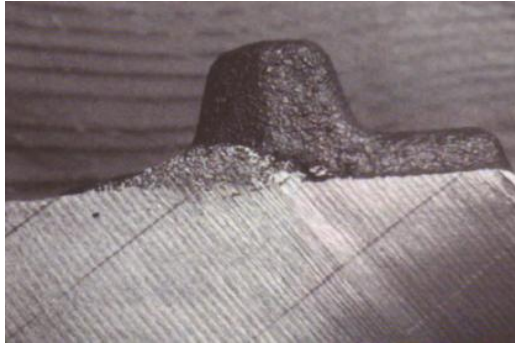
Expanzní penetrace se vyskytuje převážně u grafitických litin, a to především během eutektického tuhnutí. Nicméně představuje nebezpečí jak pro litinové, tak i ocelové odlitky, přičemž u litin se projevuje grafitickou expanzí a u oceli vznikem ředin. Tento jev byl poprvé popsán Levelinkem a Julienem [11]. Další studie naznačují, že jev je způsoben nižší měrnou hmotností grafitu vznikající během tuhnutí taveniny. Během procesu dochází k expanzi materiálu, čímž se vytváří tlak na formu a způsobuje hlubokou penetraci kovu do formy. Tlak roste se zvyšujícím se stupněm eutektičnosti slitiny a dosahuje vrcholu při eutektickém složení taveniny. Pokud není nálitek zcela ztuhlý, tlak se přenesou na jeho hladinu. Nicméně pokud je nálitek již ztuhlý, tlak vede k expanzní penetraci, především v prohrátých rozích formy (Obr. 29). [9; 11; 32]



Obr. 29 Schéma mechanismu expanzní penetrace [32].

Autoři studie [33] zjistili, že obsah fosforu v kovu může problém tohoto typu penetrace zmírnit. Je to z toho důvodu, že se zvyšujícím se obsahem fosforu dochází ke zlepšení schopnosti litiny uvolňovat expanzní tlak směrem do nálitků. Penetrace může být zcela eliminována, pokud obsah fosforu přesáhne 0,2 %. Tomuto problému lze zabránit například technologickými úpravami odlitků, jako jsou změny tvaru nebo nálitkování, aby bylo dosaženo usměrněného a rovnoměrného tuhnutí. Metalurgické vlastnosti, jako je stupeň očkování, lící teplota a chemické složení, také patří k jedním z nejdůležitějších kroků, aby se

předešlo následným problémům spojeným s mechanismem penetrace. Příklad vady způsobené expanzní penetrací je zachycen na obrázku (Obr. 30). [33; 34; 41]



Obr. 30 Řez vadou způsobenou expanzní penetrací [38].

Simulace procesu tuhnutí může pomoci předcházet vzniku tohoto problému. Umožňuje dopředu odhadnout, kde by mělo k penetraci dojít. Autoři studií zdůrazňují, že s vyšším obsahem uhlíku (nad 3,5 %) stejně jako při zvýšení obsahu fosforu se sklon k penetraci snižuje. [11; 27; 34]

4 TECHNOLOGIE VÝROBY JADER METODOU COLD-BOX

Technologie cold-box se řadí mezi nejefektivnější a nejrozšířenější procesy pro výrobu slévárenských jader při odlévání různých slitin. Během procesu výroby se využívá studených (neohřívaných) forem a katalyzačních plynů, aby došlo k následnému urychlení vytvrzení připravené jádrové směsi s pojivem. Cold-box proces je technologie s okamžitým vytvrzením jádra při pokojové teplotě a s malou potřebou pojiva. Proto je tento proces vhodný při výrobě zejména jader pro slévárny vyrábějící pro automobilový průmysl. [42; 43]

V této kapitole bude detailně popsán vývoj technologie a poté její princip. Následně bude zmíněn základní pojivový systém a požadavky sléváren na používané ostřívo z důvodu zvýšených požadavků na kvalitu odlitku. Technologie cold-box představuje průlom ve výrobě jader. Díky ní se přešlo na složitější výrobu jader, nicméně cold-boxové systémy mají i své nevýhody, které budou rozebrány v poslední podkapitole této části.

4.1 Vývoj technologie

Cold-box technologie byla vyvinuta v roce 1966 v USA Janisem Robinsem, který v tomto roce získal patent. Technologie byla poprvé patentována se systémem fenolických uretanových pojiv (PUCB – Phenolic-Urethane cold-box neboli ISOCURE) společností Ashland Chemical. Poté došlo k jejímu rychlému rozšíření do slévárenských provozů, nejprve pro slitiny hliníku. Díky vývoji a inovacím se tento proces stal dominantním způsobem pro výrobu jader, především v pokročilých zemích, jako je např. Německo nebo USA. [42; 44; 45]

Metoda se zařazuje mezi systémy II. generace vytvrzované zásahem zvenčí, tzv. profukování plynným médiem (katalyzátor – terciární amin) pro zrychlení nástupu chemické reakce a následného vytvrzení. [46; 47]

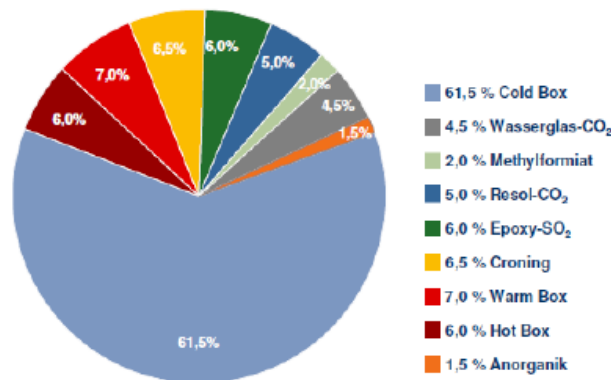
Jedním z nejdůležitějších přínosů, které tato technologie představuje, je její univerzálnost. Lze ji dle potřeb adaptovat do různých výrobních provozů. To přispívá k její velice široké aplikaci. Systémy na bázi polyuretanových pojiv umožňují produkci tvarově přesnějších jader s komplexní geometrií, což vede ke zvýšení finální kvality zhotovených odlitků. [45; 48]

Co se týče ekologie a bezpečnosti práce, došlo za poslední léta k významným zlepšením výroby ve slévárnách. Cold-boxové systémy se začaly vylepšovat, aby snižovaly obsah volného formaldehydu a fenolu, vznikajících během výroby jader. To je důležité pro následné snížení nebezpečných emisí. Významným pokrokem bylo zavedení alifatických systémů využívajících rozpouštědla, která jsou šetrnější k životnímu prostředí a jsou na bázi rostlinných olejů, tzv. bionafty. Také představují snížení emisí, jako jsou BTEX (směs látek benzenu, toluenu, etylbenzenu a xylenů) a CO₂. Byla objevena řada cold-boxových metod na bázi následujících pryskyřic: fenolická pryskyřice vytvrzovaná esterem (ECPCB – Ester-Phenolic cold-box neboli Betaset/Novaset), epoxy-akrylitická pryskyřice vytvrzovaná SO₂ (EACB – Epoxy-Acrylate cold-box neboli ISOSET), fenolická pryskyřice vytvrzovaná s CO₂ plynem (NOVANOL) a poslední uretanová akrylitická pryskyřice vytvrzovaná aminem (UACB – Urethane-Acrylate cold-box, jinak řečeno ISOMAX). Která z metod má největší zastoupení ve světě, ukazuje obrázek (Obr. 31). Tyto systémy dosahovaly dobrých výsledků. Avšak v konečném hodnocení vztaženém na výrobní náklady a hygienické podmínky se ukázalo, že z hlediska užitečných vlastností je za nejefektivnější metodu stále považována cold-box technologie. [43; 46; 49; 50; 51]



Obr. 31 Procesy cold-box a jejich aproximativní marketingové zastoupení [52].

Technologie cold-box se postupem času stala standardem v evropských slévárnách. V roce 2007 v západních zemích, konkrétně v Německu, tvořila okolo 60 % sériové výroby jader (Obr. 32). Tento podíl svědčí o účinnosti a široké přijatelnosti technologie, která byla schopna přizpůsobit se novým výzvám v oblasti ekologie, ale i produktivity nebo bezpečnosti práce. [53; 54]



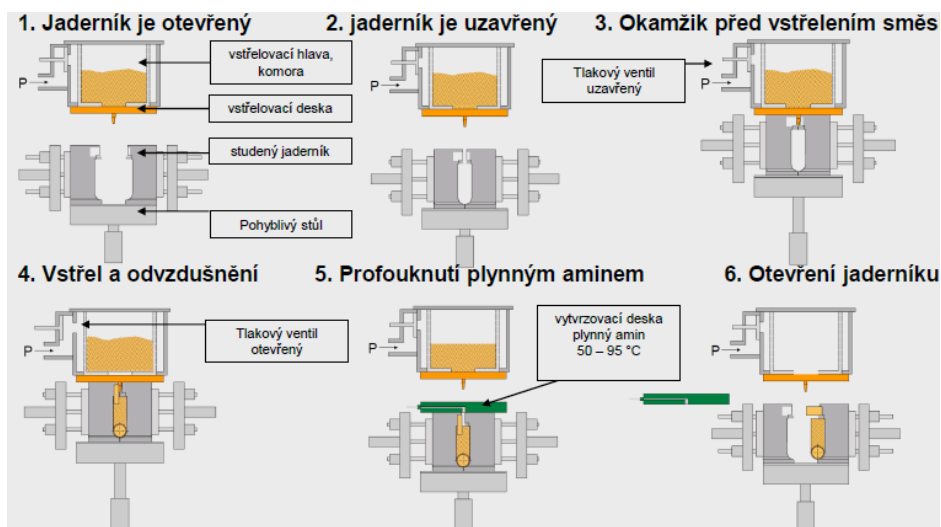
Obr. 32 Podíl zastoupení technologií na výrobu jader v Německu [46].

4.2 Princip technologie cold-box

Technologie cold-box je založena na principu chemické reakce dvousložkového kapalného pojivového systému. První složku pojivového systému představuje pojivo (např. fenol-formaldehydová pryskyřice – složka I), rozpouštědla a přísady v kapalném stavu. Druhou složkou je tvrdidlo (např. polyisokyanát – složka II) s rozpouštědly a přísadami také v kapalném stavu. Důležité je pořadí dávkování komponentů pojivového systému. Nejprve dochází k dávkování první složky – pryskyřice, která se smíchá s ostřivem ve formě nového písku a regenerátu v mísiči, poté se do směsi vmíchá tvrdidlo. Pak jsou složky pojivového systému homogenně promíchány, aby jednotlivá zrna ostřiva byla dokonale obalená pro vytvoření tzv. pojivového filmu na povrchu zrn. Pokud by došlo k porušení pořadí dávkování jednotlivých komponent, tzv. tvrdidlo před dávkováním pojiva, směs by měla sklon tuhnout okamžitě a nedošlo by k rovnoměrnému promíchání ostřiva se zbytkem kapalných komponentů. [42; 46; 49; 55; 56]

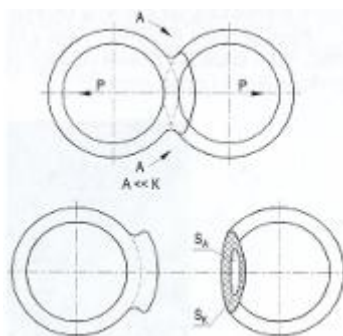
Následně je směs vstřelena stlačeným vzduchem do jaderníku, kde se zhotoví vytvrzení profouknutím plynným terciálním aminem, tzv. katalyzátorem za studena. Ke zplynění katalyzátoru dochází vzduchem zahřátým na teplotu okolo 80–100 °C ve zplyňovacím generátoru, kde se mísí s nosným plynem a stlačeným plynem. Tím se reakce mnohonásobně zrychlí. Vytvrzení probíhá v celém objemu směsi bez uvolňování vedlejších produktů. Základní princip vytvrzování jader (Obr. 33) neboli polyadice spočívá v chemické reakci, při níž reagují dva odlišné monomery s různými funkčními skupinami. Monomer obsahující proton uvolní ze své skupiny OH, ten se přesune na druhý monomer a tím dochází

k jejich spojení. Tento děj se neustále opakuje. Po reakci se mezi zrna ostřiva vytvoří pojivové můstky, které určí výslednou pevnost vyrobeného jádra.



Obr. 33 Základní princip vytvrzování jader [49].

Získaná okamžitá manipulační pevnost se liší od finální pevnosti jádra, která do 24 hodin vzroste přibližně o 20–60 %. Avšak po odlití dochází k destrukci pojivových můstků u kraje zrna (jedná se o adhezní typ destrukce pojivových můstků, Obr. 34). Dávkování pojiva vychází z množství ostřiva a jeho vlastností (kyselé, bazické nebo neutrální ostřivo), pohybuje se v rozmezí 0,4–1,2 %. Tyto hodnoty budou podobné i u dávkování tvrdidla, ale s tím rozdílem, že se bude vycházet z množství pojiva. Po ukončení reakce je potřeba zlikvidovat nespotebovaný katalyzátor, k tomu se používají tzv. pračky aminu, kde dochází k chemické absorpci na H_2SO_4 . Tím vzniká aminosulfátová sůl. Z této aminosulfátové soli lze pomocí chemického zpracování opět získat amin. [43; 46; 53; 57; 58]

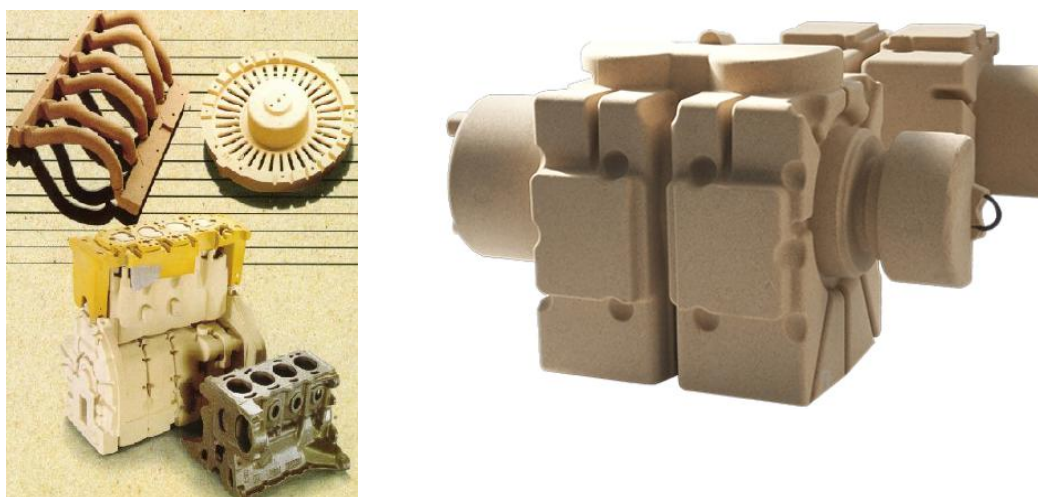


Obr. 34 Adhezní oddělení [59].

Pro ekonomickou efektivitu a ekologii je důležité optimalizovat výrobu tak, aby spotřeba katalyzátoru byla co nejnižší a doba zplynění plynným médiem co nejkratší. Plynovací stroje musí zajistit dokonalé smíchání katalyzátoru, v kapalně formě při pokojové teplotě, s nosným médiem, aby došlo k rovnoměrnému a rychlému vytvrzení všech oblastí jádra (Obr. 35). Pokud je jako nosné médium použit vzduch, musí být z velké části vysušen. Jádra zhotovená touto metodou jsou představena na obrázku (Obr. 36). [60]



Obr. 35 Postup vytvrzování jádra [61].



Obr. 36 Ukázka jader zhotovených metodou cold-box [49; 62].

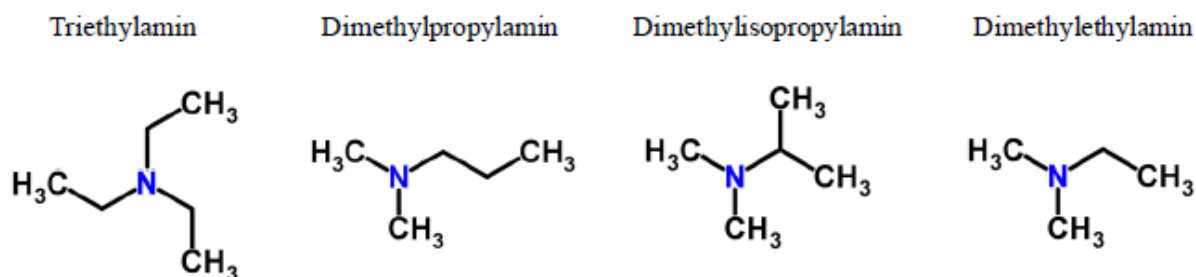
4.3 Pojivový systém

Hlavní složky pojivového systému jsou následující: ostrivo, pojivo a katalyzátor. Ostrivo je obvykle křemenné, tvoří hlavní část jádrové směsi. Pojivo se skládá ze směsi pryskyřice (fenolová, polyuretanová...) a tvrdidla (isokyanát...). [47; 58; 63]

Nejpoužívanější druh aminu je ve zkratce TEA, tzv. triethylamin, který má nicméně dvě hlavní nevýhody, a to jsou následující: má nejnižší prahovou hodnotu zápachu a pomalou reakční rychlost. Také během vytvrzování jader plynem TEA jsou vytvrzovací časy nejdelší ve srovnání s ostatními aminy uvedenými v tabulce (Tab. 5). Jako příklad je možné uvést vytvrzování zkušebního normalizovaného tělesa o průměru 50 mm a délce 350 mm, kdy vytvrzení s TEA trvá přibližně 6 s. Avšak s jiným druhem aminu, zejména DMPA, pouze 4 s. Výsledkem je zkrácení vytvrzovacího času téměř o třetinu. V sériové výrobě jader se tyto časové rozdíly mohou projevit velice výrazně a ovlivnit celou výrobu. Schéma terciálních aminů je na obrázku (Obr. 37). [47; 58; 63]

Tab. 5 Srovnání typů plynných katalyzátorů (aminů) a jejich technologických vlastností [43; 46; 49].

Chemické značení	Triethylamin	Dimetyletylamin	Dimetylisopropyl-amin	Dimethylpropylamin
Chemický vzorec	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{N}-\text{CH} \\ \quad \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{N}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Zkrácený název	TEA	DMEA	DMIPA	DMPA
Chemický vzorec	$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2$	$(\text{CH}_3)_2\text{CHN}(\text{CH}_3)_2$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{N}(\text{CH}_3)_2$
Bod varu [°C]	89	37	65	66
Bod vzplanutí [°C]	249	190	190	165
Reakční rychlost	pomalá	velmi rychlá	rychlá	rychlá
Praktická spotřeba (vztaheno na 100 % písku)	0,09–0,1 % nejvyšší spotřeba	0,03–0,04 % nejnižší spotřeba	0,05–0,06 %	0,05–0,07 %
Produktivita a výroby: doba pro vytvrzení jádra Ø 50 mm a délky 350 mm) [s]	6 nejnižší produktivita	3 nejvyšší produktivita	4	4
Pevnosti v ohybu po 24 hod.	nejvyšší	nízká	nejnižší	nízká
Prahová hranice zápachu [mg/m^3]	0,40	0,08	1,40	3,20



Obr. 37 Znázornění terciárních aminů pro technologii cold-box [46].

Co se týká skladování komponentů pojivového systému, složka I (pojivo) nemůže být vystavena přímému slunečnímu záření, také skladovací teplota by neměla klesnout pod 10 °C. Optimální teplota je v rozmezí 15–25 °C. Pokud je tato skladovací teplota nižší než 10 °C, viskozita složky I extrémně narůstá, což zapříčiní nepřesné dávkování přes čerpadlo a negativní vliv na tekutost směsi. U složky II (tvrdidlo) se viskozita v závislosti na teplotě nemění. Nicméně pokud složka II přijde do styku s vodou (vzdušnou vlhkostí), pevnostní charakteristiky směsi budou výrazně nižší. Zároveň voda podpoří vznik krystalické látky, která může způsobit ucpání až zničení čerpadel. [49; 57; 65; 66]

Vyšší dávkování složky I a II s sebou nese určité důsledky, zejména vyšší spotřebu pojiva a aminu, což má za následek subjektivní zvýšení nákladů na pojivový systém jako celek. Z ekologického hlediska značně narůstá zápach z rozpouštědel VOC (Volatile Organic Compounds neboli těkavé organické látky) a zatížení emisemi TOC (Total Organic Carbon neboli celkový organický uhlík). Dále během odlévání značně narůstá BTEX index (skupina aromatických uhlovodíků – benzen, toluen, etylen a xylen). To způsobuje zvýšený vývin plynů během odlévání, který nadále může způsobovat plynové vady v odlitku. Problém může nastat i při zhotovení jader kvůli nízké tekutosti formovací směsi, vyhotovená jádra mají tendenci lepit se na kovové jaderníky. Vliv nesouměrného dávkování složky I a složky II je uveden v tabulce (Tab. 6). [49; 64; 65; 66]

Tab. 6 Vliv nepoměru dávkování složek pojivového systému na vlastnosti jádrové směsi [46].

	Přebytek komponenty I např. 0,85 %: 0,75 %	Přebytek komponenty II např. 0,75 %: 0,85 %
Okamžitá pevnost	roste	klesá
Maximální pevnost	klesá	zůstává nezměněná
Životnost	nepatrné zhoršení	nepatrné zhoršení
Odolnost proti vzdušné vlhkosti	výrazné zhoršení	zůstává nezměněná
Odolnost proti vodním nátěrům	výrazné zhoršení	zůstává nezměněná
Náchylnost k tvorbě výronků	klesá	roste
Termická stabilita (deformace pojiva za tepla)	klesá	roste

4.4 Ostřivo

Jak už bylo zmíněno v předchozí podkapitole (4.2 Princip technologie cold-box), jádrová směs se připravuje v mísičích, a to buď v průběžných mísičích, nebo v lopatkových mísičích (Obr. 38). [60; 67]



Obr. 38 Vlevo průběžný mísič a vpravo lopatkový mísič pro přípravu formovací směsi [68; 69].

Ostřiva jsou obvykle rozdělena na kyselá (křemenné písky), neutrální (šamot, chromit, korund) a zásaditá (magnezit). Pokud se v písku nenachází žádné alkalické složky, zejména zásadité oxidy kovů, snižující pevnost finálního výrobku. Teplota ostřiva při mísení by neměla překročit 30 °C [49; 71]. Vysoká teplota může mít za následek změnu doby, po kterou se s jádrovou směsí může manipulovat, aniž by se přetrhaly pojivové můstky. Limitní doba zpracování při pokojové teplotě je okolo dvou hodin. Avšak je-li tato doba zpracovatelnosti formovací směsi přesažena, finální pevnosti zhotoveného jádra jsou velice nízké. Nadále může dojít k porušení jádra nebo k zapenetrování kovu do jádra během lití. [49; 55; 70; 71]

V německé slévárně MAT Foundries, v jejichž výrobních podmínkách byl proveden experiment popisovaný v této diplomové práci, se odlévá do forem z bentonitových směsí s cold-boxovými jádry. Křemenné písky snášejí pouze určitou lící teplotu a jsou postačující pro výrobu litinových odlitků. Při vyšších teplotách mohou nastat chemické reakce se zásaditější taveninou (obsahující Mn). Problematická je navíc tzv. cristobalitická expanze (viz kapitola 3 Mechanismy penetrace kovu), která nastává okolo 900–1000 °C a stává se nevratnou, což může vést k praskání jader a nátěrů. Litinové odlitky jsou poté náchylné ke vzniku vad typu výronky a k snadnému penetrování do hloubky kovu. Poslední nevýhodou křemenných ostřiv je nestabilní tepelná dilatace při přeměnách α -křemene na β -křemen okolo 573 °C a později okolo teploty 870 °C na α -tridymit. Důsledkem těchto přeměn je následný pokles pevnosti slévárenské formy. [4; 42; 61; 67; 72]

Na 1 kg jádrové směsi je potřeba přibližně 1 ml kapalného aminu. Dodržení správného množství aminu při vytvrzování jader je velmi důležité z několika důvodů. Pokud je směs nadměrně profukována aminem, dochází k jeho zvýšené spotřebě. To zvyšuje výrobní náklady. Navíc v nadměrně prosycené směsi zůstává více zbytkového aminu, což komplikuje skladování jader. Hotová jádra jsou pak méně odolná vůči vzdušné vlhkosti, protože amin je silně hyroskopický. Kromě toho má amin, jak již bylo zmíněno, intenzivní zápach a dráždí sliznice, takže jeho nadměrné množství zhoršuje pracovní podmínky. [43; 46; 57]

Optimální křemenné písky jsou z lokality Haltern, Grudzen Las a Badger [43]. Jiná ostřiva mají nižší ekonomický potenciál a jsou z následujících lokalit: Najpi, Provodín, Střeleč, Šajdíkovy Humence. Také mikroskopická struktura povrchu zrn písku je velice důležitá a má za následek určitou možnou úsporu dávkování pojiva a aminu až o 30 %. Např. má-li zrno pórovitou strukturu, spotřeba pojiva se podstatně zvýší oproti zrnu s hladkou strukturou povrchu. Viz tabulky (Tab. 7 a Tab. 8), kde jsou popsány hlavní požadavky na kvalitu pro ostřivo a suchý křemenný regenerát na principu mechanické otírky. [61]

Tab. 7 Požadavky na kvalitu ostřiva [49; 53; 60].

Požadovaná vlastnost na kvalitu ostřiva	Rozmezí, ve kterém se pohybuje daný požadavek na kvalitu ostřiva
Rozložení zrnitosti	křivka zrnitosti složená z 2–3 frakcí
Tvar zrna písku	kulatá zrna (minimální povrch)
Povrch zrna písku	minimálně nasákový a zvrásněný povrch
Maximální vlhkost písku	do 0,05 %
Alkalita (pH hodnota)	6,5–7,5
Obsah jemných podílů	pod 0,125 mm (prašné podíly) do 0,5 %

Tab. 8 Požadavky na kvalitu suchého mechanického regenerátu (100 % křemenný regenerát) [47; 49].

Parametr	Jednotka	Doporučená hranice
Ztráta žíháním	[%]	1–1,5
Obsah jemných podílů (< 0,125)	[%]	do 0,5
Velikost středního zrna	[mm]	0,25–0,35
pH hodnota	[–]	6–7,5
Vlhkost regenerátu	[%]	max. 0,05
Obsah dusíku	[%]	max. 0,10

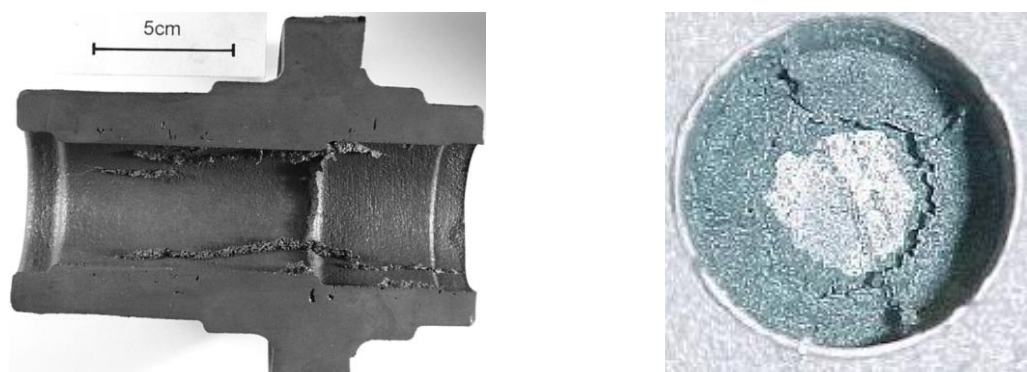
4.5 Cold-box proces ve slévárně v MAT Foundries v Ueckermünde

Všechna jádra v této německé slévárně se vyrábějí pomocí fenol-uretan-aminového procesu (PUCB) za studena na velkoobjemových jádrovacích strojích firem Hansberg, Hottinger, Laempe a Reissaus. [45; 53; 55; 57]

Proces PUCB je založen na použití křemičitého písku spojeného dvousložkovým pojivovým systémem. První část tvoří kondenzovaná fenolová pryskyřice rozpuštěná v organickém rozpouštědle. Druhou částí je polyisokyanát rozpuštěný v organických rozpouštědlech. Dále se namíchaná směs vstřeluje do jaderníku, jak už bylo popsáno v podkapitole (4.2 Princip technologie cold-box). Přednosti této metody jsou shrnuty v tabulce (Tab. 9). Dávkování složky I (pojivo) a složky II (tvrdidlo) v MAT Ueckermünde je obvykle 0,5 nebo 0,6 % při poměru 50/50. [63; 66]

Tab. 9 Výhody a nevýhody systému zavedeného ve slévárně MAT v Ueckermünde[63; 64].

Výhody systému PUCB	Nevýhody systému PUCB
nízké celkové náklady na výrobu jader	použití terciálního aminu (zápach, nebezpečný materiál)
vysoké pevnosti jádra při vytvrzování	nákladné investice do praček aminu
vyhovující rozměrová stabilita jádra	potřeba vhodných odvodušňovacích systémů odsávání
rychlé vytvrzení	náchylnost ke vzniku žilkování v odlitku (viz Obr. 39)
poměrně dobré skladovací vlastnosti	
nízké dávkování pryskyřice	



Obr. 39 Příklad vzniku časté vady systémem PUCB – žilkování [52; 73].

4.6 Výhody/nevýhody a vývojové etapy pojivového systému cold-box

Následující tabulka (Tab. 10) uvádí souhrn důležitých vlastností pro dvousložkový cold-boxový pojivový systém. Také udává, zda se jedná o příznivou vlastnost procesu, nebo v opačném případě představuje určité riziko při jeho používání. [66]

Tab. 10 Přehled výhod a nevýhod uvedených vlastností pojivového systému [49; 53; 54; 60; 61; 72].

Vlastnosti pojivového systému	Uvedená vlastnost představuje výhodu pro pojivový systém	Uvedená vlastnost představuje nevýhodu pro pojivový systém
Tekutost směsi	vysoká (nízké dávkování pojivového systému)	
Životnost	dlouhá (při použití pH neutrálního písku)	
Tepelná odolnost	vysoká termo-stabilita (příznivý vliv na rozměrovou přesnost odlitků)	
Reaktivnost směsi	vysoká (rychlé dosažení manipulační pevnosti směsi)	kratší doba zpracovatelnosti (po smíchání ostřiva s komponenty)
Dosažené pevnosti	vysoké (při nízkém dávkování)	
Rozpadavost směsi	výborná	
Použití regenerátu	použití mechanického a tepelného regenerátu (max. 95 %)	
Vývin plynu	nízký	ekologie
Ostřivo	lze použít různé druhy písků (zirkon, chromit atd.)	zvýšená citlivost na kvalitu křemenného písku (alkalita)
Náchylnost k tvorbě vad		výronky (litina, ocel); uhlíkové pleny z lesklého uhlíku (litina); dusíkové bodliny ze složky II (litina, ocel)

Vlastnosti pojivového systému	Uvedená vlastnost představuje výhodu pro pojivový systém	Uvedená vlastnost představuje nevýhodu pro pojivový systém
Skladovatelnost jader		amin je hyroskopický (přijímání vzdušné vlhkosti)
Těkavé látky		odpařování těkavých látek: VOC/TOC/BTEX; zápach aminu při výrobě jader

5 PREVENCE PROTI PENETRACI KOVU

Na rozhraní kovu s formou dochází ke vzájemnému působení tepelně chemických, fyzikálních a mechanických pochodů. Podstata těchto tří jevů z velké části ovlivňuje proces tvorby základních vlastností odlitků. [74]

Dokonalá ochrana a izolace povrchu forem, ale i jader od nežádoucích účinků roztaveného kovu spočívá ve znalostech kontaktních procesů probíhajících na rozhraní kov/forma. Nátěry a postřiky představují heterogenní systémy obsahující několik fází. Skládají se nejčastěji z výplňové hmoty, pojiva, nosné kapaliny a přísad. [74; 75]

5.1 Požadované vlastnosti na slévárenské nátěry pro zabránění penetrace kovu do jádrové/formovací směsi

Pro správnou účinnost slévárenských nátěrů je zapotřebí dodržet dostatečnou přítomnost aktivních látek, které budou mít pozitivní vliv na chemicko-fyzikálně-mechanické procesy probíhající na už zmíněném rozhraní. [9]

Požadavky na žáruvzdorné nátěry se mohou lišit podle konkrétních technologií, ale obecně je možné jejich funkci shrnout do několika hlavních bodů:

- zajistit snadné oddělení odlitého kovu od formy nebo jádra;
- zabránit pronikání roztaveného kovu do pórů formy či jádra;
- zabraňovat vzniku nízkotavitelných sloučenin (fayalit) a zároveň umožnit dostatečné zpevnění formy (jádra);
- zvýšit kvalitu povrchu odlitků. [9; 76]

Tyto podmínky může splňovat pouze tzv. ideální nátěr, který se liší od skutečného nátěru, který současně splňuje jen určitou část těchto požadavků. Nicméně aby byly nátěry v praxi použitelné, mají za úkol splňovat následující technologické vlastnosti:

- minimální sedimentace;
- dlouhá trvanlivost;
- viskozita, jemnost plniva a hustota by měly být vhodné pro ruční nanášení;
- objemová stálost během sušení a pálení nátěrů;
- objemová stálost při tepelných šocích;
- odolnost proti vzniku trhlin;
- určitá přilnavost k formovacímu materiálu. [76; 77]

Důležitou roli u žáruvzdorných nátěrů hrají také ekologické aspekty jejich výroby, hygienické podmínky při jejich používání a náklady na jejich pořízení. Pozitivní účinky používání žáruvzdorných nátěrů jsou známé již dlouho. Výrobci těchto nátěrů varují, že nesprávná volba nátěru může vést k vyšším dodatečným nákladům na opracování nebo k nárůstu neshodných výrobků, které mohou představovat až 5–10 % výrobních nákladů. [9; 78]

5.2 Základní složky žáruvzdorných nátěrů

Žáruvzdorné nátěry jsou vícekomponentní heterogenní systémy složené především ze suspenze žáruvzdorných pigmentů (plniv) v nosné kapalině. Vytváří izolační vrstvu, která nereaguje s kovem během odlévání. Dále nátěr obsahuje pojiva a další přísady, jako jsou smáčedla a antisedimentační látky zlepšující aplikaci nátěru a jeho výsledné vlastnosti. Konkrétní výrobní technologie má specifické požadavky na složení nátěrů, proto je potřeba se přizpůsobit a navrhnout vhodný nátěr tak, aby vyhovoval dané technologii. [76]

5.2.1 Plnivo

Plnivo představuje základní rozhodující složku pro slévárenské nátěry. Je nutné věnovat pozornost použité formovací směsi a odlévané slitině. V koncentrátu nátěru, což je stav od dodavatele, tvoří plnivo 50–70 %. Tato tzv. výplňová hmota má být inertní vůči působení taveniny, legujícím přísadám přidávaným do roztaveného kovu, ostřivu a zároveň ostatním složkám formovací směsi. [77; 79]

Tato složka se skládá z jemnozrnných žáruvzdorných anorganických materiálů. Využívají se různé druhy oxidů, karbidů, nitridů, boridů a v některých případech i čisté prvky. [80]

Nejčastěji využívaná plniva k přípravě nátěrů pro ocelové, litinové a neželezné odlitky jsou uvedena v tabulce (Tab. 11).

Tab. 11 Fyzikální vlastnosti běžně používaných žáruvzdorných ostřiv [9; 78; 81].

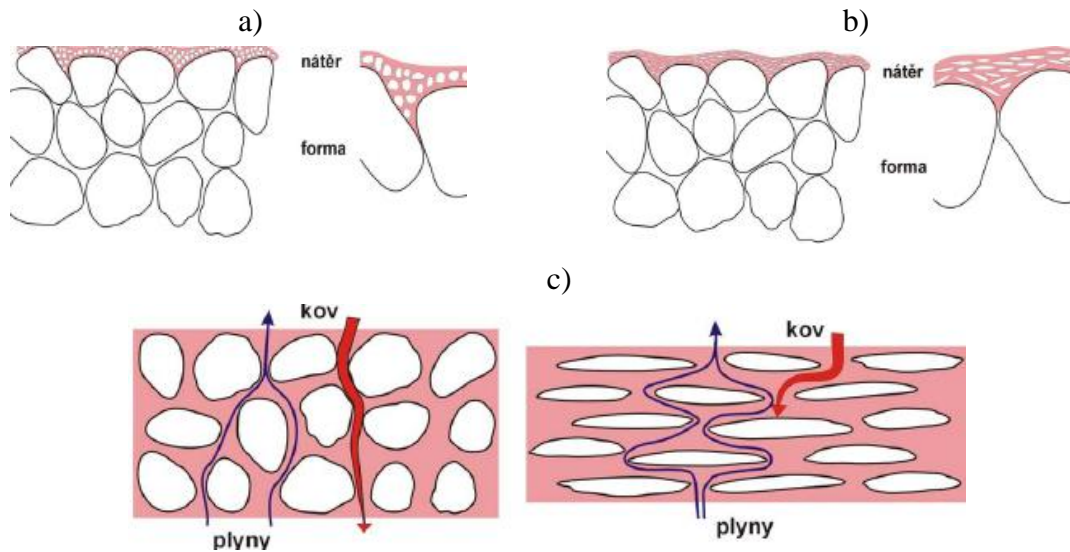
Ostřivo	Značka	Hustota [g. cm ⁻³]	Teplota tavení [°C]	Použitelnost
Magnezit	MgCO ₃	3	2800	litiny, oceli (manganové oceli)
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	3,97	2050	litiny, oceli
Hlinitano- křemičitany	Al ₂ O ₃ . SiO ₂	3,2–3,5	1700–1830	litiny, oceli, neželezné kovy
Olivín	(Mg, Fe) ₂ [SiO ₄]	3,3	1760	litiny
Mastek	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2,58–2,83	1500	litiny, neželezné kovy
Grafit	C	2,1-2,3		litiny, neželezné kovy
Křemičitan zirkoničitý	ZrSiO ₄	4,67	2200	litiny, oceli (ne pro manganové oceli)
Křemen	SiO ₂	2,6	1710	litiny

V dnešní době jsou do nátěrů přidávána různá tavidla (sklo, kyselina boritá, chloridy [Na, K, Ca, Ba, Li]), aby se dosáhlo vlastností forem, které brání mechanické penetraci kovu. Zároveň přispívají k dobrému oddělení od povrchu odlitku po odlití. V některých případech, např. u chrommagnezitu, dochází ke vzniku viskózních tavenin typu magnezioferit (MgO.Fe₂O₃) na rozhraní kov/forma, bránících penetraci kovu do formy. Zároveň se zachovává vysoká oddělitelnost od povrchu zhotoveného odlitku. [77; 82]

Tvary žáruvzdorných plniv jsou následující, viz obrázek (Obr. 40) [81; 83]:

- zrnité minerály: mají vysokou žáruvzdornost a hustotu;
- ploché destičky: představují lamely neboli plátky, mají nižší žáruvzdornost a hustotu.

Je známo, že vývoj plniv pro nátěry dospěl do bodu, kdy se pro zlepšení prodyšnosti používají plniva ve formě plochých destiček. Díky svému tvaru a uspořádání poskytují tyto destičky ochranu proti pronikání kovu do formy nebo jádra a zároveň zachovávají dostatečnou prodyšnost. [81]



Obr. 40 Různé tvary plniva: a) zrnitý, b) destičkovitý, c) průchod plynů a kovu závislý na tvaru plniva [83].

CHEMICKÁ POVAHA PLNIV

Tato vlastnost je důležitá a určuje chemický charakter celého nátěru. Chemická povaha plniva je rozhodující pro použitelnost nátěru na kyselé, zásadité a neutrální ostřivo formovací směsi. Nátěry se rozdělují následovně podle chemické povahy plniva:

- kyselé: křemenný písek, zirkon;
- neutrální: korund, chromit;
- zásadité: magnezit, chrommagnezit. [76; 77; 84]

Nejbezpečnější jsou kombinace, kdy je chemická povaha formovacích materiálů a nátěrů stejná. V dnešní době jsou nejrozšířenější nátěry neutrální, které lze kombinovat jak s kyselou, tak i se zásaditou formovací směsí. Navíc jsou neutrální nátěry netečné vůči oxidům uhlíkatých ocelí. Naopak nátěry silně zásadité v kombinaci s kyselým formovacím materiálem (pro odlití odlitků z manganové austenitické oceli) jsou nežádoucí převážně u tlustostěnných odlitků. Výběr nátěru musí zaručit spolehlivou ochranu povrchu a jeho tloušťka, krycí schopnost, odolnost proti praskání při tepelných výkyvech, přilnavost musí odpovídat dané tloušťce stěn odlitku. [77; 85; 86]

5.2.2 Pojivo

Pojivo obsahuje látky, které tmelí ostřivo po jeho vysušení a vypálení. Množství pojiva závisí na granulometrii (hrubosti) plniva. Plnivo s jemnější zrnitostí musí pokrýt větší povrch částic. Avšak malé množství této komponenty způsobuje nedostatečné propojení částic plniva, v krajním případě se nátěr může odlupovat. Naopak příliš velké množství způsobuje křehkost a praskání nátěru. [43; 75; 82; 84]

Během lití pojivo zabraňuje erozi formy a jádra proudem tekutého kovu. Navíc zabraňuje otěru a zadrobení při dopravě a následném skládání jader. Největší využití ve slévárnách mají organická pojiva, jako jsou např. sulfíkový výluh, melasa, dextrin, OB-tmel, umělé pryskyřice, jíly, vodní sklo, cementy, strusky a další. Nevýhodou, kterou představují organická pojiva, je nízká teplota rozkladu. To znamená, že jakmile v nátěrech chybí pojivo, dochází ke slinování (slepení) ostřiva a zvýšení otěru během sušení na vyšší teploty. Proto platí všeobecná zásada, která říká, že by nátěr měl obsahovat minimální obsah pojiva s největším pojivovým účinkem v intervalu teplot 100–650 °C. Navíc je zvýšený sklon ke tvorbě plynů v důsledku pyrolýzy

při kontaktu s taveninou. Proto mohou některé nátěry způsobovat vady, jako jsou exogenní bubliny. [77; 85]

5.2.3 Nosná kapalina

Nátěry lze rozdělit do tří skupin dle použití nosné kapaliny, a to následovně:

- vodné;
- bezvodé (alkoholové);
- hybridní. [47; 77]

Pro svoji jednoduchost, nenáročnost na přípravu, bezpečnost a cenu patří **vodné nátěry** k nepoužívanějším na dnešním trhu. Také méně zatěžují životní a pracovní prostředí. Co se týče skladování, nejsou uvedeny žádné specifické požadavky, avšak za provozních podmínek je nutné nátěr udržovat v pohybu, aby se zamezilo vzniku bakterií a nátěr se v poslední fázi nezkažil. [78; 81]

Bezvodé nátěry (dříve zvané vysychavé nátěry) jsou především určeny pro lití na syrovo. Nosná kapalina nezvyšuje koncentraci vody na licí formy, proto není nutno licí formy obsušovat. Dalšími složkami bezvodých nátěrů jsou přísady organických pojiv, organická ředidla (alkohol, aceton, nafta, benzín). K dokonalejším nátěrům této třídy patří pyrogely, kde je nosná kapalina tvořena cyklohexanem, který je na potřebnou viskozitu zabraňující sedimentaci ostřiva zahuštěný rozpustnými kovovými mýdly nebo stearany. Nicméně tyto nátěry jsou drahé, a proto je v některých případech cyklohexan nahrazen technickým benzínem. [79; 80]

U **hybridních nátěrů** je rozpouštědlem alkohol s vodou. Tento typ nátěru zabraňuje průchodu síry z formovací směsi do roztaveného kovu, což je klíčové pro výrobu odlitků z GJS (litina s kuličkovým grafitem). V tomto případě se nejedná o nebezpečnou směs, náklady na ředění nátěru jsou minimální a transport je podstatně jednodušší než u čistě alkoholických nátěrů. [86]

5.2.4 Přísady

Přísadami nátěrů jsou látky přidávané v malém množství a mají splnit následující body:

- zvýšit přilnavost;
- zvýšit smáčivost nátěrů;
- snížit sedimentaci plniva;
- vytvořit inertní plynnou atmosféru při lití v dutině formy;
- snížit teplotu tavení nátěru;
- vytvořit vrstvu tzv. skloviny, která se dobře odděluje od povrchu odlitku. [78; 81]

Pro zabránění sedimentaci se používají antisedimentační přísady v množství do 3 %. Nejčastější jsou natrifikované bentonity. Ty ve vodném prostředí nabývají na objemu, zvyšují viskozitu suspenze a zároveň snižují sedimentační rychlost ostřiva. Při zvýšeném obsahu těchto látek dochází k výskytu trhlin v nátěru během sušení (pálení), což závisí na poměru obsahu plniva a druhu použité antisedimentační přísady. Z tohoto důvodu je potřeba přidávat např. pouze malé množství bentonitu sodného do formovací směsi. [9]

Pro zvýšení přilnavosti a smáčivosti nátěru k povrchu forem se přidávají speciální smáčedla, např. mýdla max. do 0,5 %. Se stoupající smáčivostí se objem volných pórů snižuje až o 50 % a zvyšuje se penetrace nátěrů do formy na hloubku 2–3 pískových zrn formovacího materiálu. V případě nátěrů bez smáčedla se počet volných pórů snižuje o 25 %. Navíc má vysoká smáčivost příznivý vliv na vzájemnou soudržnost mezi každou vrstvou nátěru i během několikátého nanášení. [82]

5.3 Druhy nátěrů a jejich funkce

Úkolem nátěru je zaplnit mezery mezi zrny formy nebo jádra, což účinně zabraňuje vzniku defektů, jako jsou připečeniny, odvařeniny, výronky, pronikání kovu a další. Podle hlavní funkce se nátěry dají rozdělit do tří kategorií:

- penetrační;
- krycí;
- penetračně-krycí. [43]

Penetrační nátěry primárně slouží k zabránění pronikání roztaveného kovu do jádra. Tento typ nátěru částečně vyplňuje mezery mezi zrny jádra, čímž sám zapenetruje do povrchu a současně na něm vytvoří tenkou ochrannou vrstvu. Tato vrstva pak napomáhá ke zlepšení kvality povrchu odlitků. [4]

Krycí nátěry jsou primárně určeny ke zlepšení kvality povrchu odlitku. Na povrchu jádra nebo formy vytvářejí silnou vrstvu, která uhlazuje jejich povrch. Fungují na různých principech, které např. při kontaktu s taveninou vytvářejí ochranný plynový polštář, který zabezpečuje redukční atmosféru na rozhraní kov/forma. Zatímco jiné snižují smáčivost jádra roztaveným kovem. Výběr typu nátěru je proto nutné přizpůsobit požadované kvalitě odlitků. [4; 43]

Penetračně-krycí nátěry kombinují vlastnosti krycích a penetračních nátěrů, což umožňuje využít výhody obou typů. Nicméně ochrana proti pronikání kovu není tak vysoká jako u čistě penetračních nátěrů a dosažená kvalita povrchu odlitků nedosahuje úrovně krycích nátěrů. Tento typ nátěru je proto vhodný pro slévárny, které chtějí využít výhod obou technologií, avšak s určitou mírou snížení účinnosti. [84]

5.4 Nanášení nátěrů

Způsob aplikace představuje další významné kritérium ovlivňující výběr nátěru. Nejenže má zpětný vliv na jeho složení, ale také spolurozhoduje o kvalitě výsledné vrstvy. Existují čtyři hlavní metody nanášení nátěru: natírání, nástřik, polévání a máčení. Každá z těchto metod vyžaduje různé reologické vlastnosti, avšak ideálně by měl být nátěr vhodný pro více způsobů aplikace. Tyto vlastnosti lze optimalizovat přidáním reologických aditiv. [27]

Natírání představuje metodu velice jednoduchou a především levnou. Tato metoda se většinou používá pro velké formy. Její výhodou je, že natírání lze provádět kdekoli, což eliminuje potřebu nákladného transportního zařízení a minimalizuje ztráty nátěru. Na druhou stranu nevýhody zahrnují viditelnost tahů štětce, časovou náročnost procesu, nerovnoměrnou tloušťku nátěrové vrstvy a potřebu zkušeností pracovníka při natírání složitějších tvarů. [78]

Stříkání poskytuje možnost vysoce produktivního nanášení hladkých vrstev povlaků. Je potřeba mít komplexní přístup k procesu nanášení, který zahrnuje mechanizované jednotky s odpovídajícím stříkacím, míchacím a cirkulačním zařízením a nádržemi. [81]

Polévání je vhodné pro velká jádra a formy. Nátěr může být aplikován pomocí nádoby nebo membránových čerpadel. Nízkým tlakem je poháněn rozvodný systém a následně je skrze trysku polévána forma nebo jádro. Odtud opět stéká do sběrné nádoby, odkud je znovu nasáván čerpadly. Mezi výhody patří schopnost pokrýt velké a složité formy nebo jádra a jednoduchost aplikace. Na druhou stranu nevýhodou je náročná údržba systému, protože čerpadla a rozvodný systém se opotřebovávají abrazivními částicemi plniva. Použití této metody je také omezeno velikostí sběrné vany nátěru. Pro zajištění dobré funkce nátěru může být nutné aplikovat více vrstev. [4]

Máčení představuje rychlou metodu aplikace nátěru, nízké náklady na vybavení, možnost upravit čas máčení a tím i tloušťku nátěru. Tato technika je však vhodnější pro menší jádra. Velkou nevýhodou je, že u větších jader se mohou objevit známky přetření, což je nežádoucí, protože to zhoršuje odvod plynů z jádra, které by měly proudit přes známku do formy. Dalšími nevýhodami jsou: vznik kapek, které jsou na odlitcích viditelné, a u větších jader je nezbytné použít zvedací zařízení pro transport jádra k vaně a sušičce. [43]

5.5 Aditiva

U výroby metodou cold-box zvyšuje odlévání bez nátěrů produktivitu a zajišťuje vysokou kvalitu odlitků. Odlévání bez nátěru znamená zejména použití systému pro zlepšení povrchu odlitku, který se skládá z aditiv, vhodných pojiv a umožňuje výrobu bez nanášení nátěru. [87]

Pro slévárny to znamená možnost úspory materiálových nákladů jak na vsázkové materiály, tak na vedlejší zařízení, jako jsou sušičky atd. Také lze ušetřit jeden nebo dokonce dva pracovní kroky. Jak samotný proces nanášení nátěru, tak i následné sušení zabírající čas a zahrnující pracovníky navíc. Z tohoto důvodu dojde vynecháním těchto pracovních kroků ke zvýšení produktivity. Upuštěním od tradičního procesu nanášení nátěrů se rovněž sníží náklady na energii, protože odpadá nákladné sušení jader v sušicím zařízení. Kromě toho nátěry na bázi alkoholu představují ve slévárnách z hlediska zákonů o bezpečnosti práce potenciální nebezpečí. Proto nepoužívání těchto nebezpečných materiálů znamená zároveň zvýšení bezpečnosti. [87]

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem praktické části bylo ověřit penetraci litiny při odlévání odlitků do jádrové směsi. Bylo to ověřeno v podmínkách ve slévárně v Ueckermünde (Německo) na jejich strojích a s jejich formovacími jádrovými směsami na automatické formovací lince Disamatic. Odlévání bylo zkoušeno na materiálu, který je používán pro výrobu brzdových kotoučů. Poté byl sklon k penetraci vyhodnocen pomocí 3D skenování reálného odlitku. Také byla sledována rovinnost určitých ploch a drsnost povrchu. MAT Ueckermünde se snaží zabránit penetraci taveniny převážně používáním nátěrů na vodní bázi aplikovaných máčením (ručně nebo pomocí namáčecí vany). Z hlediska ekonomických úspor, zlepšení pracovního prostředí a ekologických opatření by bylo vhodnější omezit používání nátěrů a nahradit je organickými nebo anorganickými aditivami v jádrové směsi.

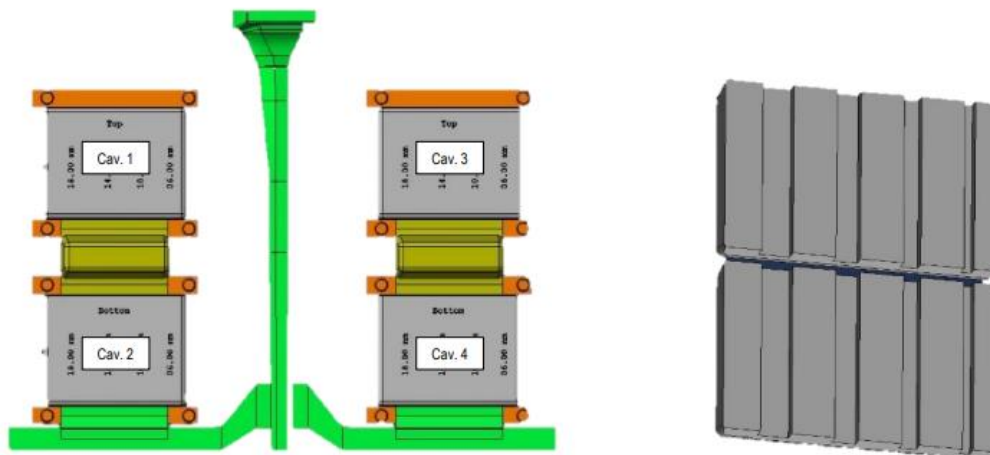
6.1 Návrh zkušební odlitku a jádra

Pro zhotovení experimentální části této práce byl navržen zkušební odlitek s příslušným jádrem na základě vybraného odlitku a jádra ze slévárny MAT Ueckermünde. Zkušební odlitek a jádro byly na základě numerického modelu upraveny tak, aby po tvarové, hmotnostní stránce, podmínky plnění a tuhnutí odpovídaly odlitku brzdového kotouče. Cílem bylo vytvořit podmínky ovlivňující zkoumané připečeniny a ověřit přínos používaných aditiv případně nátěrů.

6.1.1 Zkušební odlitek

Cílem experimentu bylo ověřit vliv aditiv a vodního nátěru na penetraci taveniny do jádrové směsi. Od každé směsi bylo vyrobeno 5 forem se dvěma odlitky, kdy každý odlitek byl tvořen dvěma kavitami (dutinami, Obr. 41). To znamená, že bylo odlito celkově 10 odlitků na směs, tedy 20 kavit. Pro následné zhodnocení bylo vybráno 8 kavit na směs, což jsou 2 formy.

Zkušební odlitek by se měl lící teplotou co nejvíce přiblížit skutečnému brzdovému kotouči. Jeden odlitek byl tvořen dvěma jádry a skládal se z dolní a horní části (Obr. 41). Ve formě se nacházeli dva odlitky, takže v jedné formě byly čtyři jádra. Na následujícím obrázku (Obr. 41 vpravo) jsou zobrazeny dvě poloviny po řezu jedním odlitkem o velikosti 180 x 120 mm. Celkové množství vyrobených zkušebních odlitků hodnocených v diplomové práci bylo 60. Nicméně rozřezáno bylo pouze 24 odlitků.

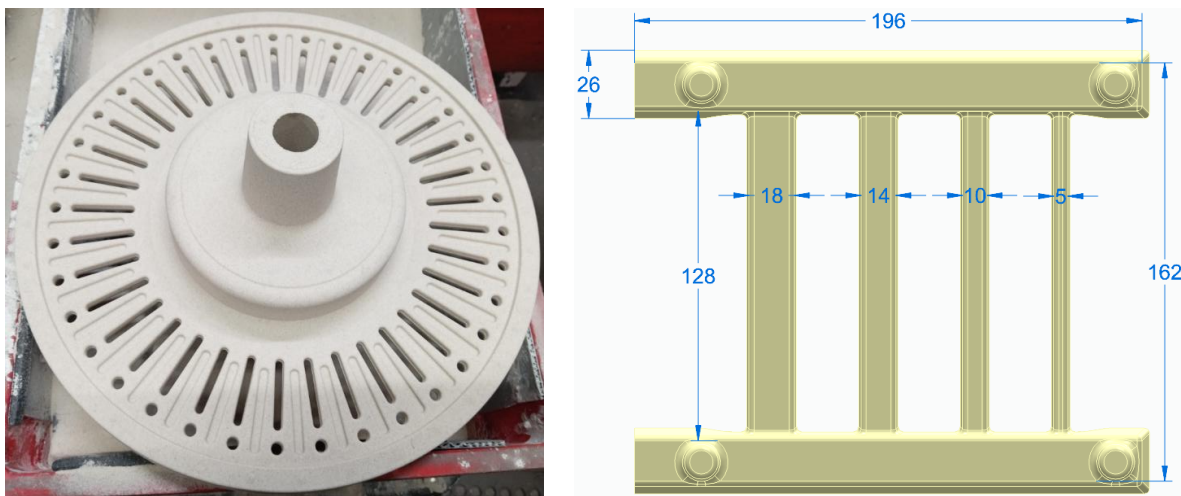


Obr. 41 Rozložení dutin (vlevo) a řez zkušebním odlitkem (vpravo).

6.1.2 Zkušební jádro

Jádro bylo navrženo s ventilačními otvory čtyř různých velikostí: 6 mm, 10 mm, 14 mm a 18 mm. Tyto otvory reprezentují chladicí žebra v odlitcích brzdových kotoučů. Ventilační otvory (žebra) pro brzdové kotouče mají rozměry přibližně od 6 mm do 18 mm, což umožňuje efektivní srovnání penetrace u různě širokých ventilačních kanálů (žeber). Celková hrubá hmotnost experimentálního odlitku je 15 kg, což odpovídá průměrné hmotnosti brzdového kotouče.

Vlevo na obrázku (Obr. 42) se nachází skutečné cold-boxové jádro určené pro výrobu brzdových kotoučů. Vpravo na obrázku (Obr. 42) je zobrazeno jádro navržené slévárnou MAT Ueckermünde. Návrh byl vytvořen na základě mnoha variant výroby jader pro brzdové kotouče simulovaných pomocí numerických simulací v rámci experimentální části diplomové práce.



Obr. 42 Příklad skutečného jádra (vlevo) a jádra, které bylo navrženo pro provedení experimentu (vpravo).

6.1.3 Výpočet geometrického modulu odlitku

Výpočet geometrického modulu zkušebního odlitku (6.1) je klíčovým nástrojem pro posouzení podmínky chladnutí a tuhnutí odlitku během lití. Modul odlitku představuje poměr mezi objemem a plochou ochlazovaného povrchu odlitku [97]. Také umožňuje odhadnout rychlost tuhnutí jednotlivých částí odlitku. Tento parametr je zásadní při návrhu vtokové soustavy a nálitků, protože ovlivňuje vznik staženin a další možné vady související s nerovnoměrným chladnutím materiálu. Následující výpočty byly provedeny na základě zkušeností MAT v Ueckermünde.

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} = [\text{cm}] \quad (6.1)$$

kde:

M_c	geometrický modul odlitku	[cm]
V_c	objem odlitku	[cm ³]
A_c	plocha ochlazovaného povrchu odlitku	[cm ²]

Ve vzorci (6.1) např. index M_c charakterizuje geometrický modul odlitku, tzv. casting modulus, kde index c (casting) odkazuje na odlitek, pro který se výpočet provádí.

Pro výpočet modulu odlitku je nutné vypočítat objem odlitku V a plochu odlitku A , a to následovně (6.2), (6.3) a (6.4) [97]:

$$V_c = \frac{m}{\rho} = [\text{cm}^3] \quad (6.2)$$

kde:

m	surová hmotnost odlitku	[g]
ρ	hustota pro litinu GJL	[g*cm ⁻³]

Po dosazení do vzorce (6.2) pro výpočet objemu se dosáhne následujícího výsledku [97]:

$$V_c = 787,6 \text{ cm}^3 \quad (6.3)$$

Po dosazení do vzorce (6.1) pro výpočet geometrického modulu odlitku, se dosáhne následujícího výsledku [97]:

$$M_c = 1,7 \text{ cm} \quad (6.4)$$

6.1.4 Výpočet a navržení nálitku (feeder calculation)

VÝPOČET MODULU NÁLITKU ZKUŠEBNÍHO ODLITKU (M_F)

Náletek (feeder) je přídavný objem kovu připojený k odlitku, který kompenzuje stahování materiálu během chladnutí a tuhnutí. Pokud je náletek správně navržen, ztuhne až jako poslední a umožní doplnění kovu do oblastí odlitku, kde by jinak vznikly staženiny. Cílem výpočtu nálitku (6.5) je zajistit dostatečný objem tekutého kovu a dobu tuhnutí, aby se předešlo vzniku vnitřních vad v odlitku [97]. Výpočet modulu nálitku je upřesněn v následujícím vztahu:

$$M_F = K_M * M_C = [\text{cm}] \quad (6.5)$$

kde:

M_F	modul nálitku	[cm]
K_M	konstanta modulu	[-]
M_C	modul odlitku	[cm]

Konstanta modulu pro podeutektickou litinu s lupínkovým grafitem (GJL) je v rozmezí od 0,6–1 [-], proto byla zvolena hodnota 0,9 [-]. Po dosazení do vzorce (6.5) pro výpočet modulu nálitku se dosáhne následujícího výsledku [97]:

$$M_F = 1,48 \text{ cm} \quad (6.6)$$

To znamená, že aby náletek zůstal tekutý déle než odlitek, musí mít modul alespoň 1,48 cm (6.6).

KONTROLA OBJEMOVÉHO KRITÉRIA

Další krokem je ověřit, zda má náletek dostatečný objem vzhledem k odlitku (6.7). Používá se následující vztah [97]:

$$15 \% * V_F \geq \text{smrštění} * V_C \quad (6.7)$$

kde:

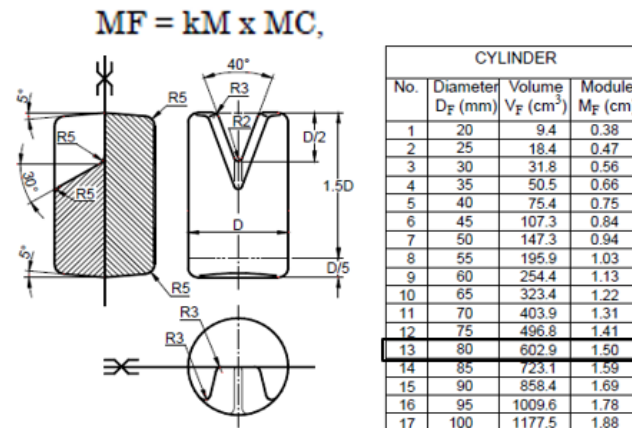
V_F	objem nálitku (530 cm ³)	[cm ³]
smrštění	pro GJL (2 %)	[%]

V_C objem odlitku [cm³]

Po dosazení hodnot z předchozího výpočtu (6.3) dostáváme následující hodnoty [97]:

$$79,38 \text{ cm}^3 \geq 7,988 \text{ cm}^3 \quad (6.8)$$

Podmínka je splněna, což znamená, že náletek je dostatečně velký k zajištění přísunu tekutého kovu do odlitku. Podle výpočtu geometrického modulu nálitku (6.6) byl podle obrázku (Obr. 43) navržen finální průměr nálitku, což je 80 mm o objemu 603 cm³. [97]



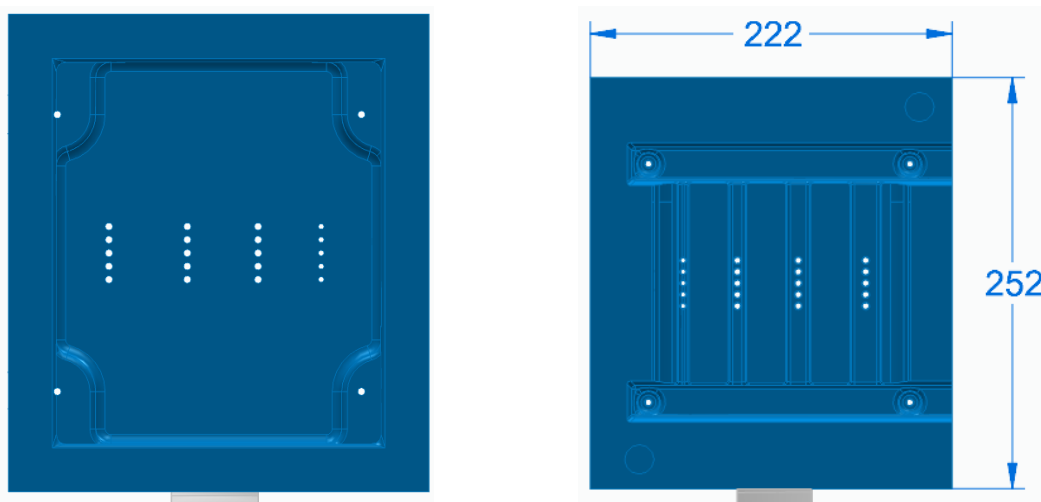
Obr. 43 Finální rozměry pro náletek válcovitého tvaru.

6.2 Výroba jaderníku a zkušebních jader

Jádrová směs byla zvolena typu cold-box, a proto její výroba probíhala ve slévárně MAT Ueckermünde. Výroba jaderníku proběhla externí firmou. Následné úpravy jaderníku byly provedeny slévárnou MAT.

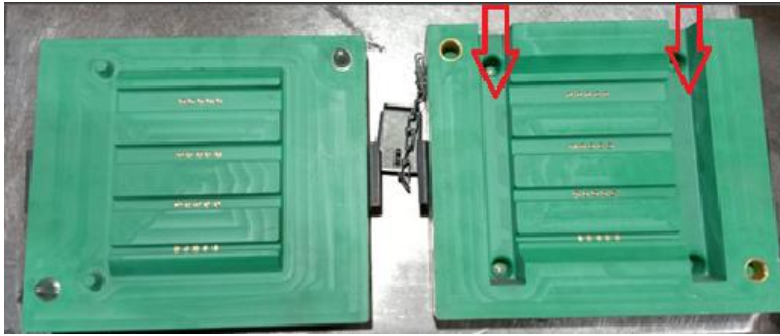
6.2.1 Jaderník

Jaderník o velikosti 222 x 252 mm je rozdělený na přední a zadní část se svislou dělicí rovinou. Jaderník obsahuje otvory o průměru 4 mm, které slouží jako ventilační systém pro odvod plynu při vstřelování viz obrázek (Obr. 44).



Obr. 44 Přední část zavřeného a otevřeného jaderníku.

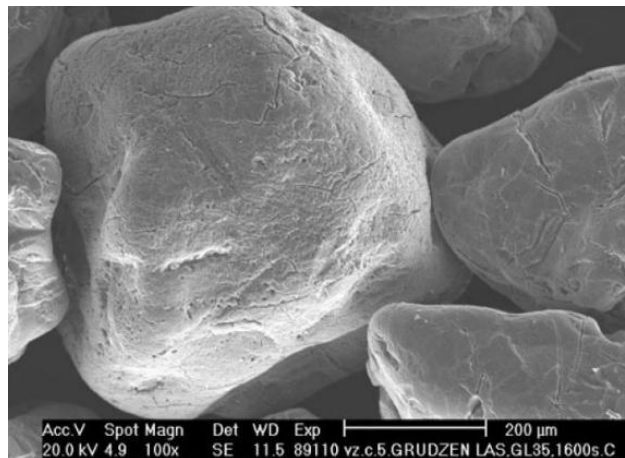
Na obrázku (Obr. 45) se nachází snímek otevřeného už zhotoveného jaderníku pro výrobu zkušebních jader. Šipky naznačují směr vstřelování jádrové směsi.



Obr. 45 Vyrobený jaderník na zakázku pro experimentální část diplomové práce.

6.2.2 Jádrová směs

Pro výrobu jader zhotovených metodou cold-box byl ve slévárně MAT Ueckermünde použit polský písek Grudzen Las (GL), s označením GL 21. Číslo 21 je označení pro písek o jemné zrnitosti s hodnotou středního zrna d_{50} okolo 0,20 mm. Písek GL se těží v Lodžském vojvodství od počátku třicátých let 20. století [88]. Tento písek je známý svým oválným tvarem (Obr. 46), vysokou tepelnou vodivostí a nakonec vysokým obsahem SiO_2 (Tab. 12).



Obr. 46 Tvar a povrch ostřiva GL [89].

Pro výrobu jader je voleno jemnější ostřivo, což může mít příznivý vliv na penetraci taveniny do jádrové směsi, než kdyby bylo použito hrubší ostřivo.

Tab. 12 Parametry a chemické složení křemenného ostřiva GL [88].

Parametry a chemické složení ostřiva GL 21	Hodnota	Jednotky
Střední zrna d_{50}	0,20–0,24	[mm]
Vyplavitelné látky	0,20	[%]
SiO_2	min. 99,2	[%]
Fe_2O_3	max. 0,07	[%]
Al_2O_3	max. 0,20	[%]
Teplená degradace	min. 1550	[°C]

6.2.3 Aditiva

Pro experimentální ověření v rámci diplomové práce bylo použito pět aditiv od společnosti Hüttenes-Albertus, z nichž dvě jsou organická a tři anorganická. Tato aditiva byly přidána v koncentraci doporučené výrobcem do písku ještě před přísadou pojiva a tvrdidla. Dále byla směs homogenizována v lopátkovém míšiči během 40 s. Poté byla přidána pryskyřice, tvrdidlo a vše bylo znovu promícháno po dobu 1 min. Základní informace o jednotlivých použitých přísadách jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 13), která poskytuje přehled jejich hlavních charakteristik. Páté aditivum od společnosti Hüttenes-Albertus použité v experimentu zatím není dostupné na trhu, protože se stále nachází ve fázi vývoje. Z tohoto důvodu o něm nebyly získány žádné bližší informace ani ve formě pracovních listů či dalších podkladů.

Tab. 13 Přehled pěti aditiv a jejich základní informace [90; 91; 92; 93; 94].

Aditiva	organická		anorganická		
	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5
Informace o produktu					
Charakteristika	impregnovaná směs organických materiálů, především z obnovitelných surovin	suchá směs organických materiálů pro použití jako přísada do jádrového písku	suchá směs anorganických minerálů pro použití jako přísada do jádrového písku	suchá směs anorganických minerálů pro použití jako přísada do jádrového písku	
Hustota [kg/m^3]	556	1000	833	2000	2500
Barva (Obr. 47)	černá	červená	tmavě šedá	červenohnědá	hnědočervená
Bod varu [$^{\circ}\text{C}$]				1375	
Doba skladování	12 měsíců při skladovací teplotě 15–20 $^{\circ}\text{C}$	24 měsíců při skladovací teplotě 15–20 $^{\circ}\text{C}$	24 měsíců při skladovací teplotě 15–20 $^{\circ}\text{C}$	12 měsíců při skladovací teplotě 15–20 $^{\circ}\text{C}$	
Oblast použití	k zamezení defektů při expanzi, jako jsou žilky	pro tenkostěnné odlitky, pro defekty v oblasti žeber	k zamezení defektů při expanzi, jako jsou žilky	pro tenkostěnné odlitky, pro defekty v oblasti žeber	
Ztráta žíháním [%]		50–60	< 1,0	< 1,0	
Proces	cold-box	cold-box	cold-box/ hot box/ warm box	cold-box/ hot box/ warm box	
Pokyny k aplikaci	přidávaná množství obvykle 1,0–3,0 % do směsi, vztaženo na množství použitého ostříva	závisí na použitém procesu výroby jádra; obvyklé dávkování 0,5–2,0 %	obvyklá přidávaná množství jsou 3,0–7,0 %, vztaženo na množství použitého ostříva	závisí na použitém procesu výroby jádra; obvyklé dávkování 2,5–7,0 %	

6.2.4 Dávkování aditiv

V praktické části experimentu bylo celkově vyrobeno 20 jader od každého aditiva a 20 jader se standartní jádrovou směsí opatřených pouze vodním nátěrem. Celkový počet vyrobených jader bylo 120. Bylo tak rozhodnuto z toho důvodu, že do jedné formy přijdou 4 jádra pro odlití dvou odlitků. Dohromady bylo odlito od všech jader 60 odlitků. Hodnoceno bylo pouze 24 odlitků. Dvě jádra byla vyrobena navíc od každého aditiva pro případnou náhradu poškozeného jádra během manipulace. Přehled dávkování jednotlivého aditiva, příslušné koncentrace složky I (pojivo) a složky II (tvrdidlo) je zachycen v následující tabulce (Tab. 14).

Tab. 14 Přehled dávkování jednotlivých aditiv.

Aditiva	organická		anorganická			Vodní nátěr
	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Dávkování [%]	5	3	10	5	10	
Dávkování [kg]	2,5	1,5	5	2,5	5	
Složka I [%]	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	
Složka I [g]	550	600	550	500	500	
Složka II [%]	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	
Složka II [g]	6,05	7,2	6,05	5,0	5,0	

Snímky jednotlivých aditiv je možné vidět na obrázku (Obr. 47). Lze si povšimnout různých barev u každého aditiva. Aditiva mají také různou hustotu a zrnitost. Anorganická aditiva měla vyšší hustotu i větší zrnitost než organická aditiva.



Obr. 47 Přehled použitých aditiv v experimentu od výrobce Hütennes-Albertus.

Přestože nátěry významně přispívají k dobré kvalitě odlitků, představují také možný zdroj chyb v procesním řetězci, který je třeba zohlednit v případě problémů souvisejících s výrobou a jejich řešení. Tento zdroj chyb lze eliminovat přechodem z jader opatřených nátěry

na jádrové směsi s aditivem. Tímto způsobem by se dalo předejít vadám odlitků specifickým pro nátěry, jako je odpadnutý nebo rozplavený nátěr [11; 12]. Přehled očekávaných výhod a nevýhod při použití aditiv je uvedený v následující tabulce (Tab. 15). [95]

Tab. 15 Přehled očekávaných výhod a nevýhod při použití pouze aditiv [87; 95].

Použití aditiv	
výhody	nevýhody
působí proti žilkování	vyšší cena
zabraňuje penetraci kovu	vysoké dávkování
zvýšení produktivity výroby jader	

6.2.5 Výroba zkušebních jader

Proces výroby cold-boxových jader s aditivem probíhal v několika krocích. Nejprve bylo nutné připravit samotnou jádrovou směs. Každé z pěti aditiv bylo přesně naváženo dle stanoveného dávkování (Tab. 14) a následně smícháno s odpovídajícím množstvím pryskyřice a tvrdidla. Směs byla důkladně promíchána v mísiči během 40 s, aby bylo zajištěno homogenní rozložení všech složek.

Před zahájením samotné výroby jader bylo nutné přenastavit vstřelovací stroj Laempe 2 (Obr. 48), aby odpovídal požadovaným parametrům výroby. Než však byla do směsi přidána aditiva, byla nejprve vyrobena zkušební jádra ze standardně používané jádrové směsi. Po dosažení uspokojivých výsledků byla tato jádra namočena do nátěru a následně použita pro experiment. Teprve poté byla zahájena výroba cold-boxových jader s aditivem, která byla vstřelována dle připraveného postupu.



Obr. 48 Cold-boxová vstřelovačka Laempe 2.

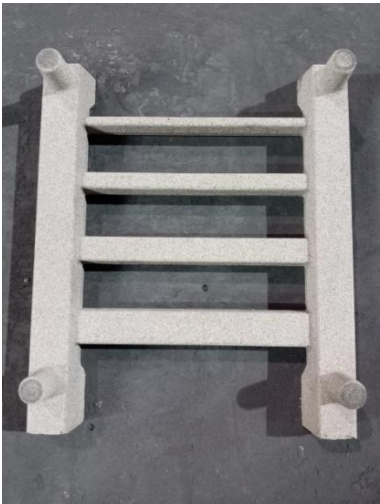

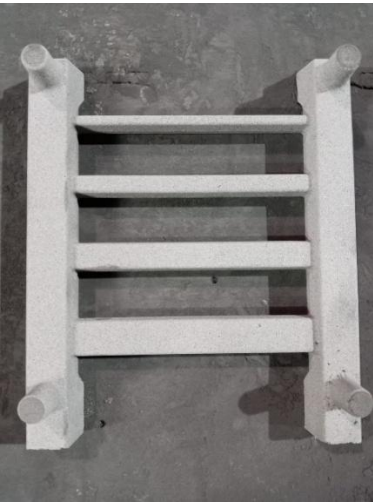

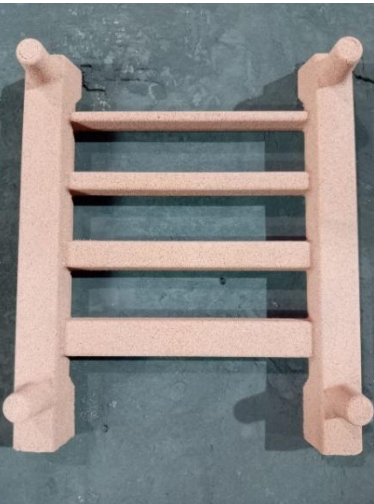

Samotná výroba jader, tedy vstřelení jádrové směsi, její vytvrzení aminem a odstranění přebytečného plynu, trvala přibližně 50 s. Následné vyjmutí a očištění jaderníku, aplikace separačního spreje proti přilnutí jádrové směsi, uzavření jaderníku bočními zámky a jeho zajištění klíny, aby se během výroby neotevřel, trvalo přibližně 1 min.

Před výrobou jader s jiným aditivem a různým dávkováním pryskyřice a tvrdidla byla směs zcela vypuštěna ze zásobníku jádrové směsi. Poté byly vstřelovací hlava a deska kompletně vyčištěny. Tato operace trvala přibližně 15 min, přičemž tento čas zahrnuje i navážení dalšího aditiva a následnou homogenizaci směsi se zbytkem přísad.

Na vstřelovacím stroji byl přenastaven vstřelovací čas z původních 1,5 s na 2,5 s, čímž došlo k prodloužení doby potřebné pro vstřelení jádrové směsi. Dále byl tlak vstřelování snížen z 5 bar na 4 bar. Ostatní parametry stroje zůstaly beze změny, což umožnilo udržet stabilitu výrobního procesu při upravených hodnotách vstřelovacího času a tlaku. Dávkování aminu bylo 1 cm^3 , což odpovídá množství potřebnému k vytvrzení jednoho jádra. Doba pro vytvrzení jednoho zkušebního jádra o hmotnosti kolem 4 kg byla 8 s.

Zhotovená jádra jsou zobrazena v tabulce (Tab. 16) označená čísly 1–6. Jádra byla jednotlivě zvážena. Následně byla vypočítána průměrná hodnota z pěti měření od každé směsi (Tab. 16). Je možné si povšimnout mírného nárůstu hmotnosti u anorganických jader oproti organickým. Nicméně nejtěžší bylo jádro s nátěrem.

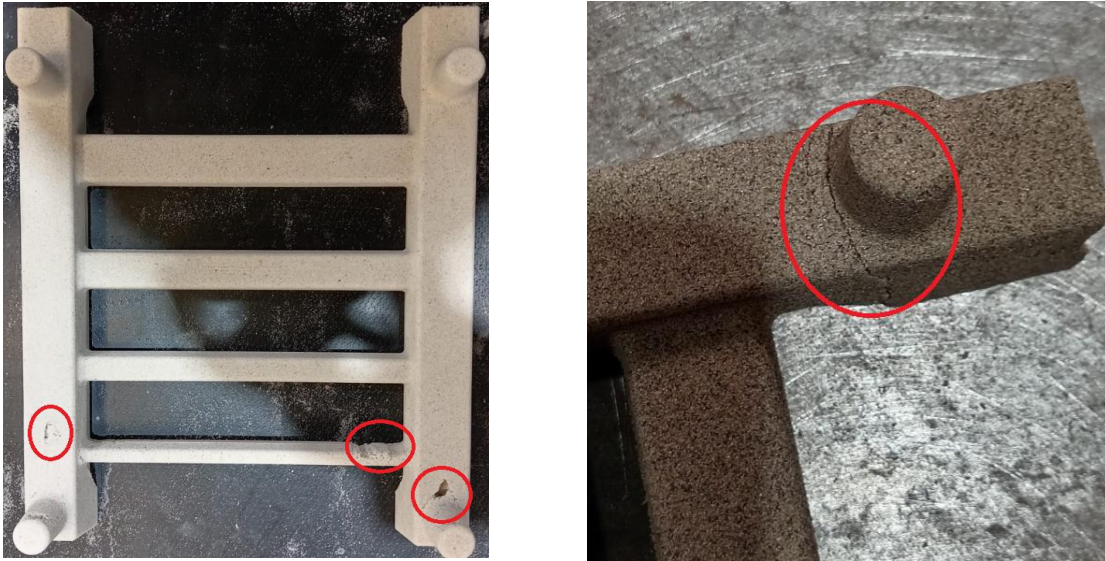
Tab. 16 Přehled zhotovených jader s aditivy a hmotnosti jednoho kusu.

<p style="text-align: center;">č. 1</p> 	<p style="text-align: center;">č. 2</p> 	<p style="text-align: center;">č. 3</p> 
<p style="text-align: center;">411 g</p>	<p style="text-align: center;">432 g</p>	<p style="text-align: center;">414 g</p>
<p style="text-align: center;">č. 4</p> 	<p style="text-align: center;">č. 5</p> 	<p style="text-align: center;">č. 6</p> 
<p style="text-align: center;">446 g</p>	<p style="text-align: center;">449 g</p>	<p style="text-align: center;">457 g</p>

6.2.6 Optimalizace výroby jader

Během výroby jader došlo ke komplikacím, které vedly k úpravě jaderníku, konkrétně k přidání odvzdušňovacích otvorů zejména na plochy mezi žebry a v rozích. Bylo to provedeno proto, aby nedocházelo k zahlcení vzduchu v jádře.

Většina prvotně vyrobených jader vykazovala praskliny v místě známky jádra v blízkosti vstřelovacího otvoru (Obr. 49). U některých došlo k prasknutí nebo nedostřelení nejtenčího žebra v místě jeho spojení se známkou jádra (Obr. 49 vpravo). Proto během výroby jader byly prováděny konstrukční úpravy jaderníku, které těmto vadám zabránily. Také pro minimalizaci problémů byl dále jaderník pravidelně ošetřován separátorem, aby se zabránilo ulpívání jádrové směsi uvnitř jaderníku.

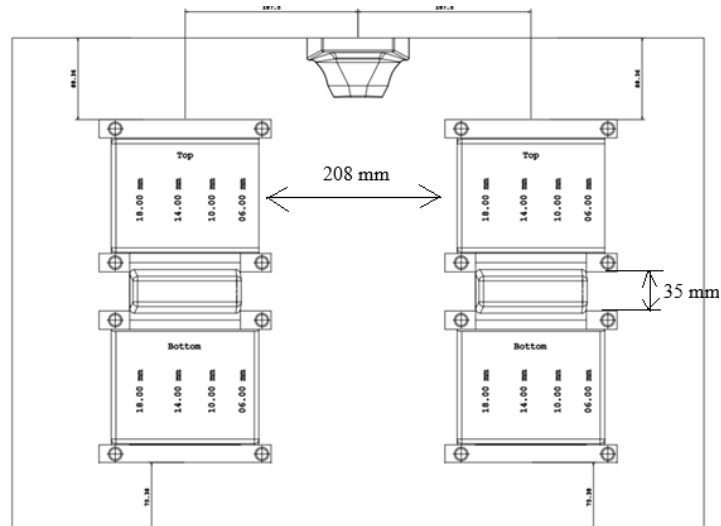


Obr. 49 Příklad neshodných jader.

6.3 Výroba modelu a forem

6.3.1 Uložení modelu na modelové desce

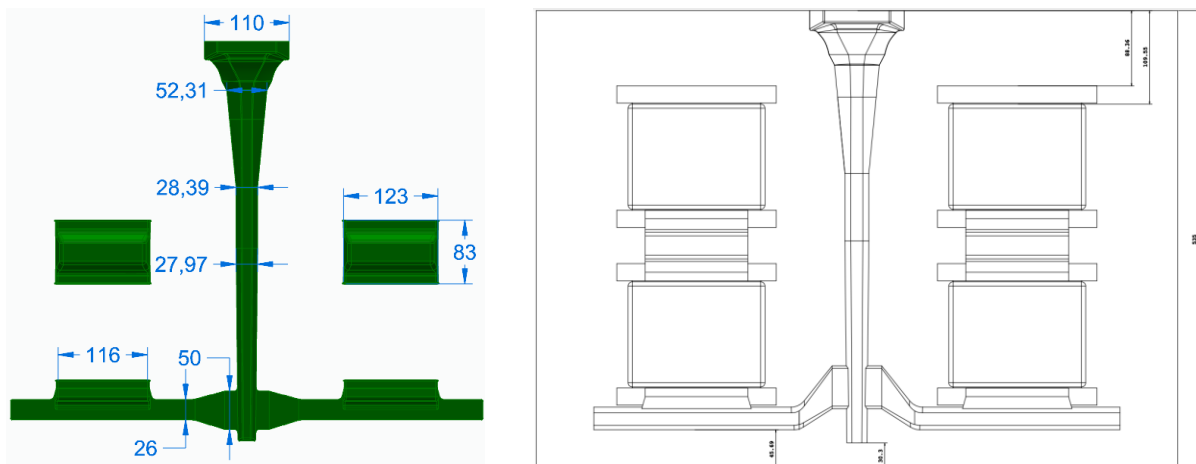
Modelová deska byla navržena pro výrobu dvou odlitků během jednoho lití. Pro zhotovení dvou odlitků je zapotřebí čtyř jader tvořících dolní a horní část zkušební tělesa. Modely odlitku jsou od sebe vzdáleny 208 mm na modelové desce. Horní a dolní část zkušební odlitku jsou od sebe vzdáleny 35 mm. Od horního okraje modelové desky je model vzdálen 88 mm, od dolního okraje modelové desky 75 mm (Obr. 50).



Obr. 50 Uložení modelu na modelové desce.

6.3.2 Navržení vtokové soustavy

Vtoková soustava byla navržena s průtokovou rychlostí taveniny v řídicím průřezu rozváděcího kanálu 3,0 kg/s a konstrukčně je podobná jako u odlitků brzdových kotoučů. Forma obsahuje čtyři dutiny (kavity) a je vybavena menšími zářezy pro horní a spodní segmenty, což umožňuje snadné oddělení jednotlivých částí. Vtoková soustava je uložena ve vzdálenosti 30 mm od spodní části modelové desky (Obr. 51).



Obr. 51 Uložení vtokové soustavy na modelové desce a její rozměry.

Pro navržení vtokové soustavy se vychází z předpokladu, že se jedná o přetlakovou vtokovou soustavu (6.9). Platí následující předpoklad [98]:

$$\text{Poměr } S_{hs} : S_{vs} : S_z = 1,6 : 1,3 : 1 \quad (6.9)$$

Kde:

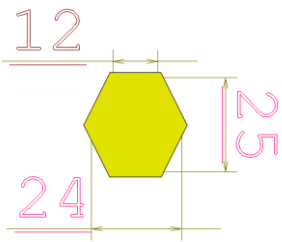
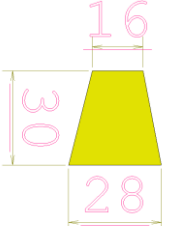
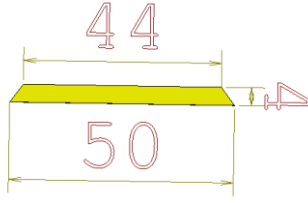
S_{hs} plocha průřezu hlavního rozváděcího kanálu (struskováku), který zaujímá zároveň funkci licího kůlu $[\text{mm}^2]$

S_{vs} plocha průřezů vedlejšího struskováku $[\text{mm}^2]$

S_z plocha průřezů všech zářezů $[\text{mm}^2]$

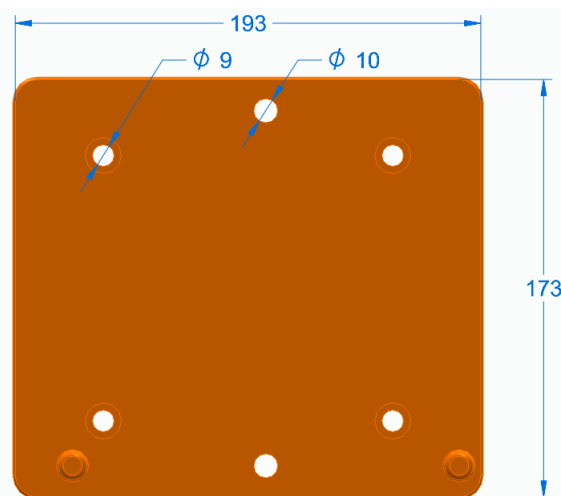
V následující tabulce (Tab. 17) jsou zmíněné hlavní části vtokového systému (vtokový kůl, rozváděcí kanál a zářezy). Ke každé této části je uvedena její plocha a navržený tvar.

Tab. 17 Přehled průřezů částí vtokové soustavy [97].

	vtokový kůl	rozdávěcí kanál	zářez
plocha [mm ²]	414	660	188
tvar			

6.3.3 Zakladač jader

Zakladač jader, jinými slovy maska, je uvedena na obrázku (Obr. 52). Zařízení pro vkládání jader je vybaveno vakuovým systémem, který zajišťuje správné umístění jader tím, že je udržuje na místě podtlakem. Otvary o průměru 10 mm proudí vzduch a vytváří se vakuum. Bezpečnostním prvkem je světelná závora, která zastaví veškeré pohyby v případě jejího narušení. Nicméně světelná závora je na začátku cyklu narušena operátorem při vkládání jader. Po dokončení vkládání musí operátor bezpečnostní závoru opustit, čímž se vyšle signál k pokračování cyklu.



Obr. 52 Zakladač jader pro automatickou bezrámovou Disamatic linku.

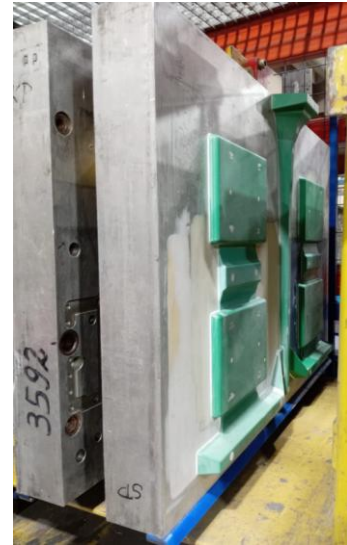
Proces zakládání jader probíhá v několika krocích. Nejprve operátor vloží jádra do masky. Dále se maska přesune k automatické Disamatic lince a zastaví se za řadou forem ve chvíli, kdy se formovací komora uzavře. Poté se zakladač jader (maska) přiblíží k formě, dokud se jí nedotkne. Zvýšením tlaku se zajistí správné umístění jader. Jakmile jsou jádra pevně usazena, vakuový systém se vypne a maska uvolní jádra. Následně se maska odsune od formy a nakonec se vrátí do výchozí polohy. Tím je cyklus dokončen.

6.3.4 Výroba modelu

Modelové zařízení, které zahrnuje zadní a přední modelovou desku spolu se zakladačem jader pro automatickou linku Disamatic (Obr. 53), bylo částečně navrženo ve slévárně MAT, následně vyrobeno a upraveno stejnou externí firmou, která vyrobila také jaderník.



a) zadní modelová deska



b) přední modelová deska



c) zakladač jader

Obr. 53 Modelové zařízení na výrobu forem pro zhotovení zkušebních odlitků.

6.3.5 Výroba forem

Po vstřelení jednotné bentonitové směsi do komory se zadní deska začíná pomalu pohybovat k přední desce (nepohyblivá část modelového zařízení). Tímto se vytvoří bezrámová forma, která je ihned zadní deskou s pístem posunuta k předchozí formě. Takto je zhotovena forma, do které se následně ihned odlévá.

Jádra byla operátorem zakládána do zakladače jader, přičemž na jednu formu připadla čtyři jádra (Obr. 54). Zakladač jader se následně přiblížil k vytvořené formě. Jakmile byla jádra pevně uložena v dutině formy pomocí navržených trnů, zakladač jader se vrátil do své původní pozice.

Vlevo na obrázku (Obr. 54) lze vidět zakladač jader se zkušebními jádry, která jsou na něm držena podtlakem, zatímco vpravo na obrázku (Obr. 54) jsou jádra uložena v dutině formy. Druhá část bentonitové formy je představena na obrázku (Obr. 55). Cílem bylo vyrobit celkově 60 zkušebních odlitků (30 forem) pro všechny typy jádrových směsí či nátěru.



Obr. 54 Zakladač jader se zkušebními jádry (vlevo) a jádra uložená ve formě (vpravo).



Obr. 55 Zadní část formy s vtokovou soustavou

6.4 Lití

Slévárna MAT Ueckermünde má dvě automatické Disamatic linky, konkrétně DISA 230-X (DISA 2) a DISA 250-C (DISA 4). Odlévání proběhlo na lince DISA 2. Odlévalo se ihned po zaformování na stejné lince do jednotné bentonitové směsi. Formy se postupně pohybují po pohyblivém pásu, tedy dopravníku, až dojedou k licímu poli. Odlévání probíhá gravitačně přes zátkový uzávěr na licím zařízení.

6.4.1 Materiál

Materiál určený pro odlévání zkušebních odlitků je stejný jako v případě výroby standartních brzdových kotoučů. A to je litina s lupínkovým grafitem třídy GJL 150 s ferito-perlitickou matricí. Jedná se o jednu z několika tříd litiny GJL, která se běžně používá pro výrobu brzdových kotoučů. V následující tabulce je uvedeno přibližné složení kovu použitého pro experiment v rámci DP (Tab. 18).

Tab. 18 Složení kovu použitého pro výrobu brzdových kotoučů a zkušebního odlitku.

Prvek	C	Si	Mn	P	S
% v kovu	3,60	1,85	0,68	0,05	0,075

STUPEŇ EUTEKTIČNOSTI

Stupeň eutektičnosti (S_E) představuje způsob vyjádření vlivu chemického složení litiny na její grafitizaci (6.10). Je definován jako poměr skutečného obsahu uhlíku k obsahu uhlíku odpovídajícímu eutektické koncentraci při daném množství křemíku a fosforu. [96]

$$S_E = \frac{C}{4,25 - 0,3 (Si + P)} = 0,97 [-] \quad (6.10)$$

Jelikož byl $S_E < 1$, litina je tedy mírně podeutektická.

Pro porovnání s jinými třídami GJL používanými pro výrobu brzdových kotoučů je v následující tabulce (Tab. 19) uvedena predikce stupně eutektičnosti vlastností odlévaných materiálů GJL ze slévárny MAT Ueckermünde dle skript Jaromíra Roučky [96]. Je důležité sledovat, jak se parametr S_E mění s rozdílnými třídami litiny. Avšak pro výrobu brzdových kotoučů jsou používány eutektické litiny, protože mají vyšší tepelnou vodivost i útlum.

Tab. 19 Vlastnosti a složení nelegovaných litin s lupínkovým grafitem dle literatury [96].

ČSN EN-GJL	150	200	250
R_m [MPa]	150–250	200–300	250–350
R_d [MPa]	600	720	840
HB_{max} [-]	200	220	240
S_E [-]	0,99–1,11	0,93–0,99	0,87–0,93
Struktura	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit + ferit

Z předchozí tabulky (Tab. 19) je zřejmé, že se zvyšující se mezi pevnosti je stupeň eutektičnosti nižší. To znamená, že chemické složení litiny se vzdaluje od eutektického bodu, a tedy výsledná litina je méně náchylná k mechanické penetraci. Proto lze konstatovat, že z tohoto hlediska, má materiál GJL 150 větší sklon ke vzniku mechanické penetraci.

6.4.2 Výpočet kritického úhlu smáčení

Penetrační index (3.5) [v podkapitole 3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)] slouží k predikci vzniku připečenin [4]. Vyjadřuje poměr mezi skutečným úhlem smáčení a kritickým úhlem smáčení.

Kritický úhel smáčení (6.11) podle [4] je klíčovým parametrem určujícím podmínky smáčivosti formy. Pokud skutečný úhel smáčení formovací směsi taveninou klesne pod hodnotu kritického úhlu může docházet k penetraci směsi. Nižší hodnota kritického úhlu znamená nižší pravděpodobnost mechanické penetrace formovací směsi [31]. V tomto případě byl kritický úhel spočítán pro podmínky slévárny MAT a pro ostřívo GL 21, tj. pro provozní podmínky ($d_{50} = 0,21$ mm a $h = 0,57$ mm) dle vzorce z podkapitoly [3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)] [4].

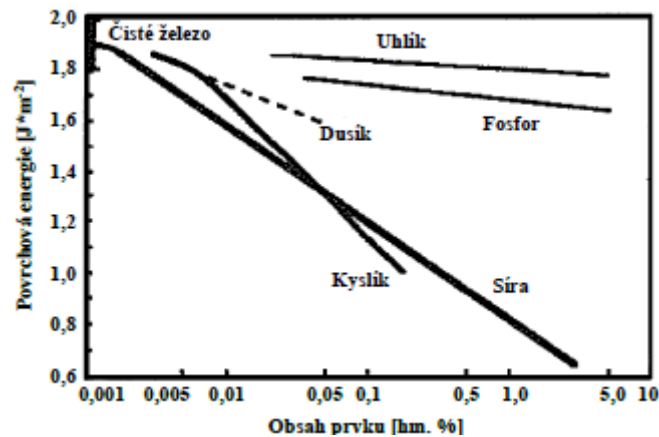
$$\theta_{kr} = \cos^{-1} \left[-\frac{d_p}{4\gamma_{LV}} (\rho gh) \right] = [^\circ] \quad (6.11)$$

kde vstupní hodnoty jsou následující:

Tab. 20 Vstupní hodnoty pro rovnice (3.6) a (6.11). [4]

Veličina	Hodnota	Popis
d_p [m]	$92,4 \cdot 10^{-6}$	pro ostřívo s $d_{50} = 0,21$ ze vzorce: $d_p = 2 * 0,22 * d_{50}$ [32]
γ_{LV} [J. m ⁻²]	1,8	odvozené z grafu vlivu prvků na povrchové napětí železa při teplotě okolo 1550 °C (Obr. 56) [32]

Veličina	Hodnota	Popis
ρ_{GJL} [kg. m ⁻³]	6900	hustota litiny v tekutém stavu
g [m. s ⁻²]	9,81	gravitační konstanta
h [m]	0,57	největší metalostatická výška, které jsou zkoumaná jádra vystavena na DISA 230-X v provozu MAT Ueckermünde



Obr. 56 Graf vlivu prvků na povrchové napětí železa při teplotě přibližně 1550 °C.

Po dosazení z tabulky (Tab. 20) do vztahu (6.11) bylo stanoveno:

$$\theta_{kr} = \cos^{-1}\left[-\frac{d_p}{4\gamma_{LV}}(\rho gh)\right] = 119,7^\circ \quad (6.12)$$

Výše spočítaný kritický úhel smáčení (6.12) je důležitým parametrem pro níže uvedený výpočet penetračního indexu.

6.4.3 Výpočet skutečného úhlu smáčení

Výpočet skutečného úhlu smáčení byl proveden dle rovnice (6.13) pro $T = 1380$ °C. Ta představuje lící teplotu používanou pro odlévání brzdových kotoučů v provozu MAT Ueckermünde. Rovnice (6.13) odpovídá vztahu (3.4) v podkapitole [3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)].

$$\begin{aligned} \theta_A = & 292,837 - 45,159 * [\% C] - 106,134 * [\% Si] - 343,401 * [\% S] - 18,527 \\ & * [\% Mn] - 36,678 * [\% P] + 0,341 * T + 31,813 * [\% C * \% Si] - 0,118 * [\% C * T] \\ & + 96,114 * [\% Si * \% S] + 0,544 * [\% S * T] + 129,745 * [\% Mn * \% P] = 64,9^\circ \end{aligned} \quad (6.13)$$

kde:

X% zastoupení jednotlivých prvků v tavenině [hm. %]
viz podkapitola 3.1

T lící teplota [°C]

6.4.4 Výpočet penetračního indexu

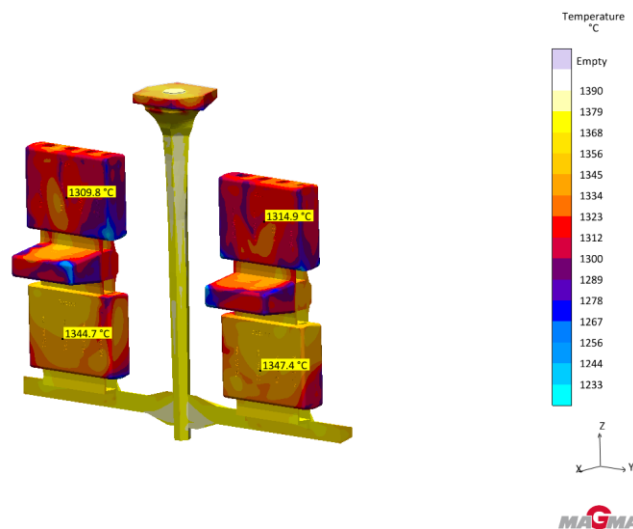
Penetrační index PI z podkapitoly [3.1 Penetrace kovu přes tekutou fázi (mechanická penetrace)] představuje kritérium pro posouzení sklonu k tvorbě penetrace za daných podmínek odlévání litinových odlitků. Dosazením θ_A a θ_{kr} do vztahu (6.14) byla určena hodnota penetračního indexu přibližně 0,54.

$$PI = \frac{\theta_A}{\theta_{kr}} = 0,54 [-] \quad (6.14)$$

Jelikož penetrační index < 1 , během lití zkušebního odlitku mohou vznikat podmínky pro vznik mechanické penetrace.

6.4.5 Simulace výroby experimentu zkušebního odlitku

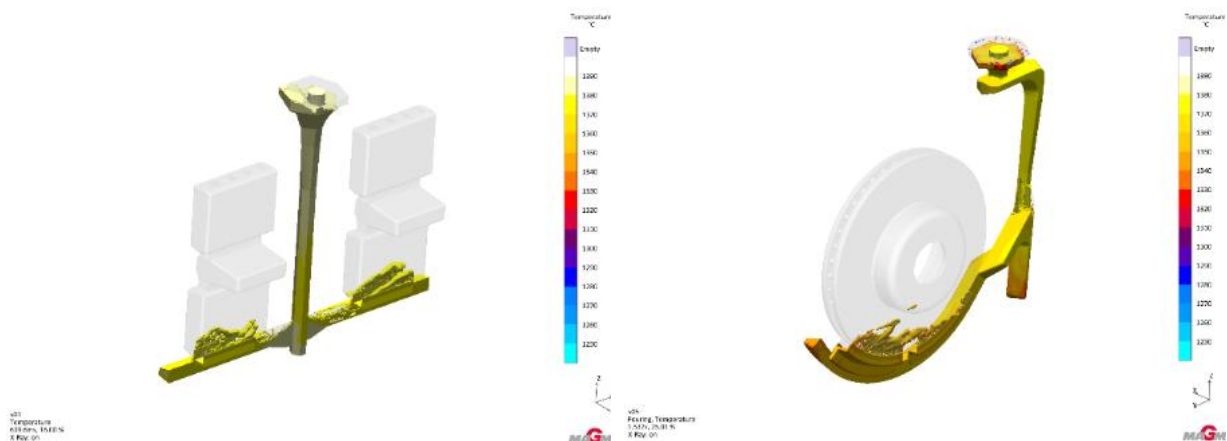
Simulace chladnutí a tuhnutí experimentálních odlitků byla prováděna ve slévárně MAT v programu MAGMA. Teplota zkušebního odlitku dle simulace po odlití je dle programu MAGMA srovnatelná s teplotou odlitků brzdových kotoučů. To dává předpoklady, že výsledky obou studií lze vzájemně porovnávat. Teplotní průběh na konci lití u zkušebního odlitku je ve spodní části bloku okolo $1345 \text{ }^\circ\text{C}$ a v horní části okolo $1310 \text{ }^\circ\text{C}$ (Obr. 57). Teplotní simulace ukazují mírně vyšší teploty v průběhu plnění na pravém zkušebním bloku než na levém. Příčiny toho nebyly nadále zkoumány, protože z hlediska posouzení sklonu k penetraci se nepovažovaly za důležité.



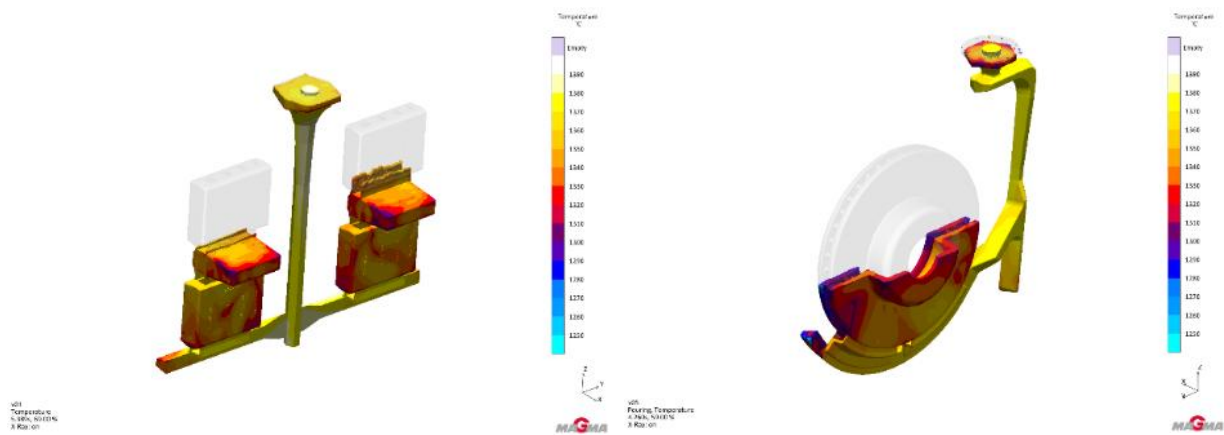
Obr. 57 Teplotní simulace na konci lití zkušebního vzorku.

Rozložení teplot v odlitcích v průběhu lití u zkušebního odlitku a brzdového kotouče dle simulace je zachycen na obrázku (Obr. 58). Z tohoto obrázku lze vysledovat, že průběh simulace teploty je velmi podobný, resp. srovnatelný se zkušebním odlitkem hodnoceným v rámci DP.

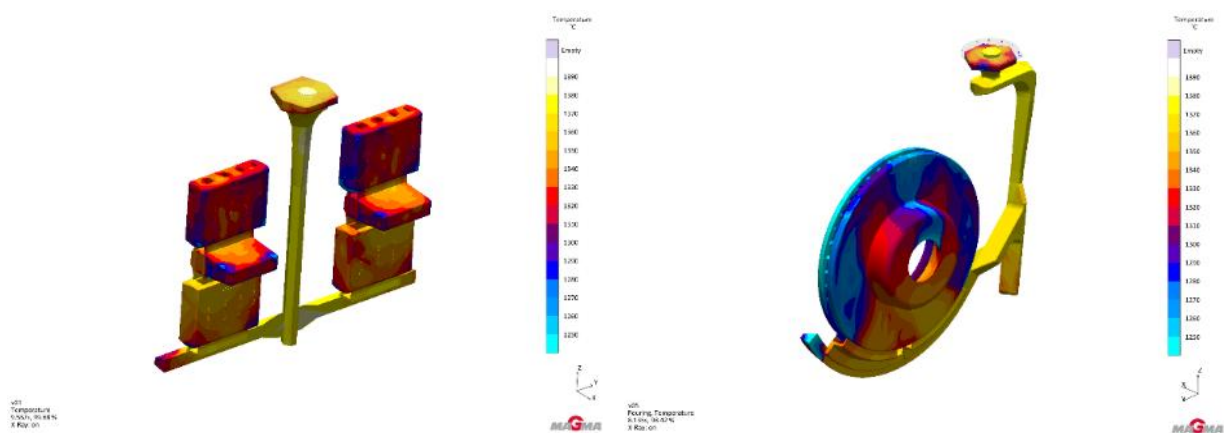
začátek lití (2 s)



průběh lití (4 s)

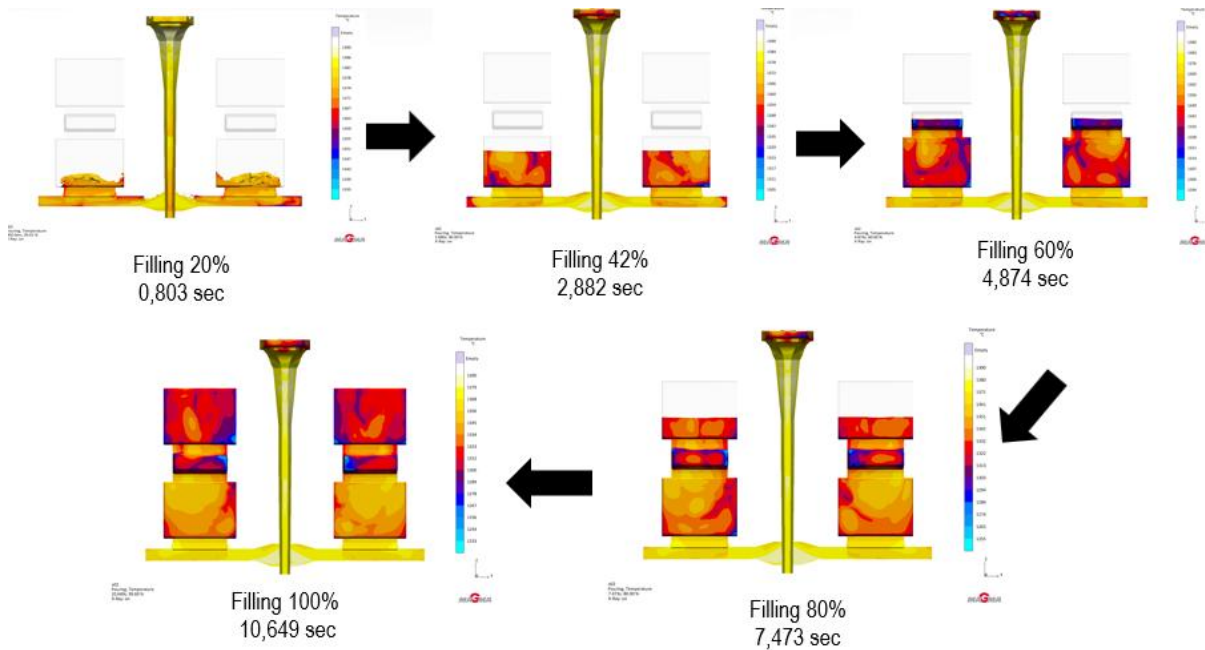


konec lití (9 s)



Obr. 58 Srovnání teplotního průběhu plnění zkušební vzorku a brzdového kotouče.

Brzdový kotouč o průměrné surové hmotnosti přibližně 35 kg má průměrnou dobu plnění 9,5 s, což odpovídá rychlosti plnění okolo 3,5 kg/s. V experimentální formě se nacházejí dva zkušební odlitky o společné surové hmotnosti 37 kg, což znamená při době plnění přibližnou rychlost plnění 3,5 kg/s (Obr. 59). Z pohledu plnění dutiny formy to je naprosto v pořádku ve srovnání s reálným odlitkem brzdového kotouče.



Obr. 59 Přehled času plnění zkušebního odlitku.

6.4.6 Průběh lití

Formy byly po výrobě a založení jader přesunuty po pohyblivém pásu na lící pole, kde probíhalo gravitační lití (Obr. 60 vlevo). Litina byla očkovaná přímo do proudu kovu. Odlité formy (Obr. 60 vpravo) se následně přesunuly do chladicího tunelu, poté na vibrační pás a nakonec do chladicího bubnu.



Obr. 60 Průběh lití zkušebního odlitku.

Odlitky byly po vychlazení rozděleny dle podmínek výroby do 6 skupin podle použité přísady příp. použití nátěru. Zkušební odlitky byly otryskány, dále odstraněny vtokové soustavy a nálitky. Vybrané kusy (celkově 24 odlitků) byly rozřezány pásovou pilou. Následně probíhalo experimentální a statistické zhodnocení odlitků ke sklonu k penetraci.

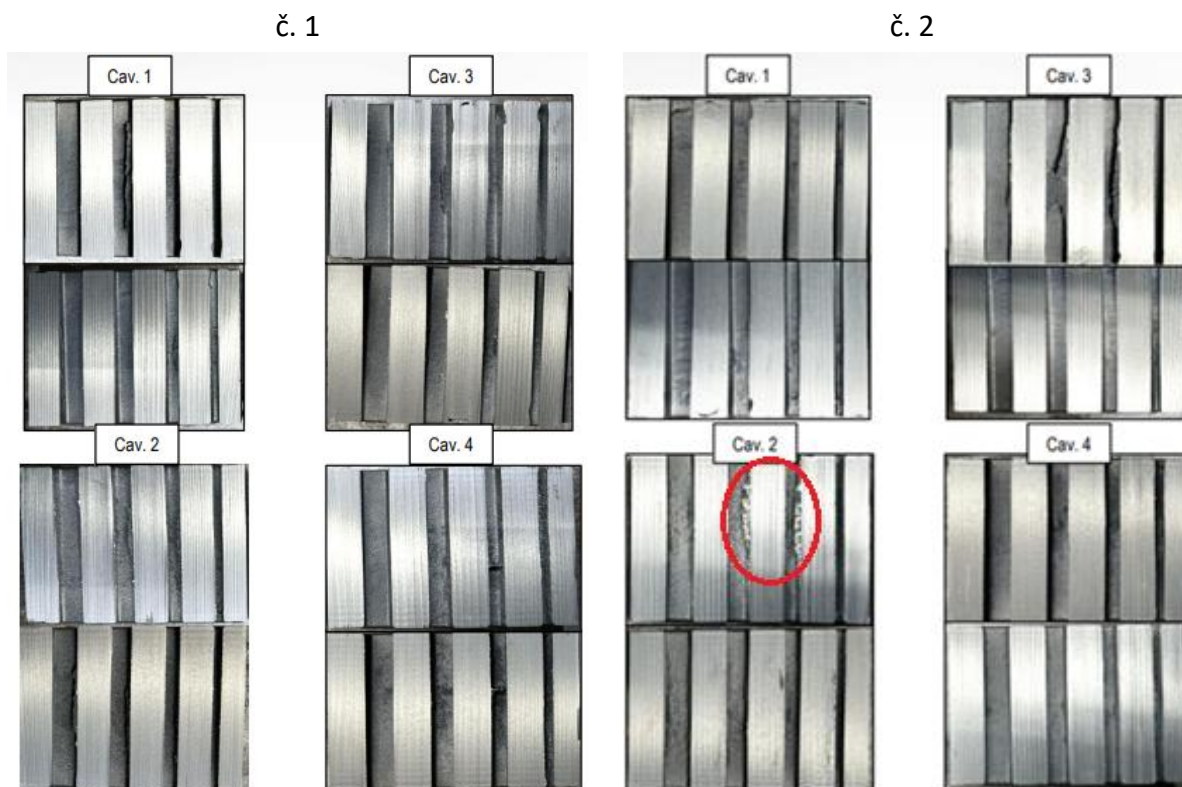
7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Vyhodnocení výsledků z praktické části proběhlo nejdříve vizuální kontrolou, kde byly kontrolovány zjevné vady povrchu jako jsou povrchové připečeniny, povrchové trhliny.... Poté bylo provedeno 3D skenování povrchu 24 zkušebních odlitků. Cílem tohoto skenování bylo změřit hodnotu rovinnosti na zkušebním odlitku a pomocí nástrojů statistické analýzy je porovnat s limitní předem stanovenou hodnotou pro brzdové kotouče 0,50 [-]. Nakonec bylo provedeno měření drsnosti povrchu bezkontaktní metodou na optickém mikroskopu Alicona Infinite Focus na 6 zkušebních odlitcích pro žebro 1. Naměřené hodnoty byly následně vzájemně porovnány.

7.1 Výsledky vizuální kontroly

Před provedením 3D skenování povrchu zkušebního odlitku byla nejprve provedena vizuální kontrola odlitků (Obr. 61). Tato kontrola zahrnovala hodnocení povrchu a přítomnosti defektů (trhlin, zadrobenin). Všechny odlitky byly po vizuální kontrole bez vady. Následně proběhlo rozříznutí zkušebních kusů, na jejichž řezu byla provedena vizuální kontrola penetrace či jiných defektů jako jsou např. zadrobeniny. Někde viditelné defekty a penetrace byly zjevné a na jiných odlitcích ne. Detailnější posouzení pak bylo určeno 3D skenováním.

Na následujícím obrázku jsou uvedeny dva odlitky se směsí č.1 (Obr. 61 vlevo) a dva odlitky se směsí č.2 (Obr. 61 vpravo). Označení kavita (dutina) 1-4 se používá pro popis jednotlivých dutin ve formě. Jedna forma obsahuje dva odlitky a čtyři kavity. U uvedeného zkušebního odlitku ze směsi č. 1 nebyly pozorovány žádné zřejmé vady. Ale jak ukazuje např. obrázek (Obr. 61 vpravo), je možné vidět zadrobeniny a zapenetrovaná místa zkušebního odlitku. Pro posouzení drobnějších zadrobenin a míry zapenetrování, byla použita metoda 3D skenování.



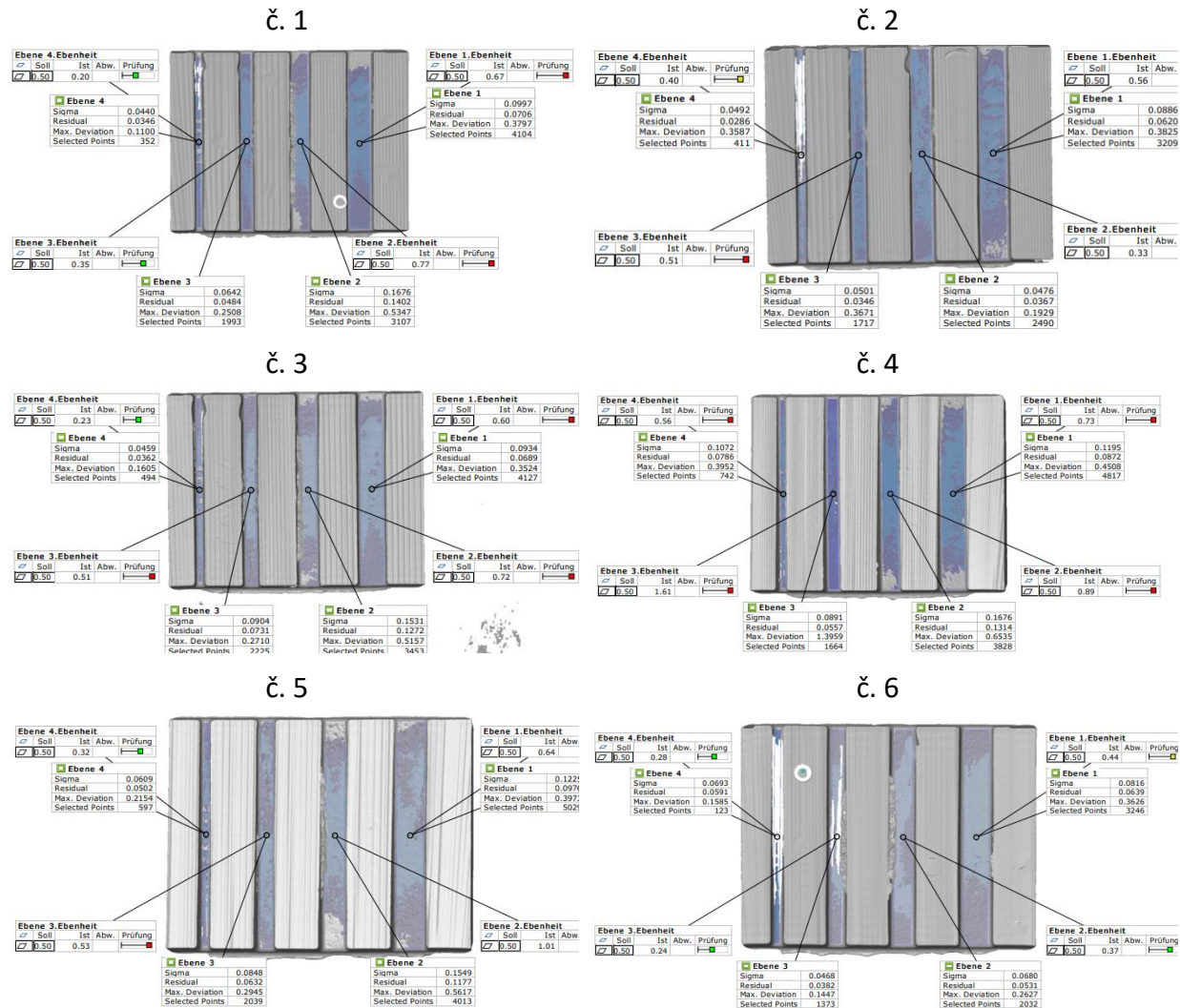
Obr. 61 Snímky rozřezaných zkušebních odlitků u směsi č.1 a č.2.

7.2 Výsledky 3D skenování

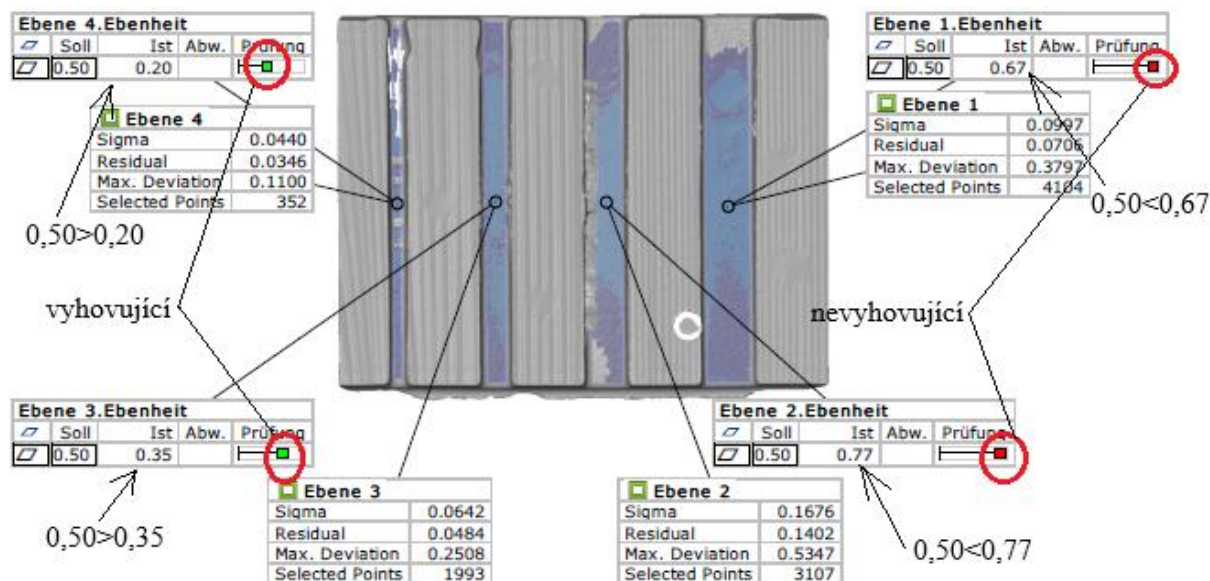
Po vizuální kontrole viditelných defektů odlitků pouhým okem, bylo následně provedeno 3D skenování (Obr. 62). To umožnilo detailní analýzu geometrických odchylek a rovinnosti na 24 zkušebních odlitcích ve 4 dutinách z každé formy s daným typem přísady či nátěru.

Na (Obr. 62) jsou zpracovány výsledky 3D skenování pro jeden odlitek z každé směsi pro kavitu 1. Tento kompletní záznam byl získán 48 krát (proběhly dvě sady měření) pro kavitu 1–4.

DUTINA 1 (KAVITA 1)



Na obrázku (Obr. 63) je zobrazen detail výsledku ze 3D skenování pro kavitu č. 1 pro směs č. 1. Z obrázku (Obr. 63) je možné vidět, že žebro 1 (Z1 o tloušťce 18 mm) a žebro 2 (Z2 o tloušťce 14 mm) překračují předem stanovenou limitní hodnotu rovinnosti 0,50. Naproti tomu žebra 3 (Z3 o tloušťce 10 mm) a 4 (Z4 o tloušťce 5 mm) jsou z pohledu rovinnosti vyhovující.



Obr. 63 Detail výsledku ze 3D skenování u směsi č. 1, kavita č. 1.

Jak bylo uvedeno, celkově bylo odlито 60 odlitků, ale hodnocení bylo provedeno pro 24 odlitků. V následujících tabulkách (Tab. 21) a (Tab. 22) se nachází záznam z první sady měření ze 3D skenování pro 12 odlitků. V případě, kdy naměřená hodnota u žebra Z1–Z4 přesáhla předepsanou hodnotu rovinnosti 0,50; v tabulce tato hodnota je označena křížkem. Jestliže naměřená hodnota je pod stanovenou limitní hodnotou rovinnosti 0,50; v tabulce je tato hodnota označena fajfkou.

Tab. 21 Výsledky ze 3D skenování pro směsi č. 1–6, kavita č. 1–4.

	č. 1				č. 2				č. 3			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
kavita 1	x	x	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x	x	✓
kavita 2	x	x	x	✓	x	✓	✓	x	x	x	x	x
kavita 3	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	✓	✓	✓
kavita 4	✓	✓	x	x	✓	x	✓	x	x	x	✓	x

Tab. 22 Pokračování předchozí tabulky (Tab. 21): výsledky ze 3D skenování pro směsi č. 1–6, kavita č. 1–4.

	č. 4				č. 5				č. 6			
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4	Z1	Z2	Z3	Z4
kavita 1	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
kavita 2	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
kavita 3	x	x	✓	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
kavita 4	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓

Výsledky 3D hodnocení rovinnosti ukázaly, že pouze u směsi č. 6, jejíž jádra byla opatřena náterem, se všechny naměřené hodnoty nacházely v mezích tolerance rovinnosti.

7.3 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v programu MINITAB na základě dříve naměřených hodnot rovinnosti povrchu na zkušebních odlitcích. Poté byly provedeny testy, jejichž cílem bylo:

- ověřit, zda data neobsahují hrubé chyby;
- zjistit, jaký typ rozdělení dat vykazují, resp. zda odpovídají normálnímu rozdělení;
- stanovit základní statistické charakteristiky: v případě normálního rozdělení byla určena střední hodnota, intervalový odhad střední hodnoty a směrodatná odchylka, v případě jiného rozdělení byl stanoven medián;
- provést analýzu ANOVA (analýza rozptylu) a ANOVA (analýza střední hodnoty), jejichž cílem bylo zjistit, zda mezi jednotlivými skupinami existují statisticky významné rozdíly v hodnotách rovinnosti. Tj. které přísady nebo nátěr mají prokazatelný a statisticky významný vliv na hodnotu rovinnosti.

7.4 Experimentální plán měření rovinnosti

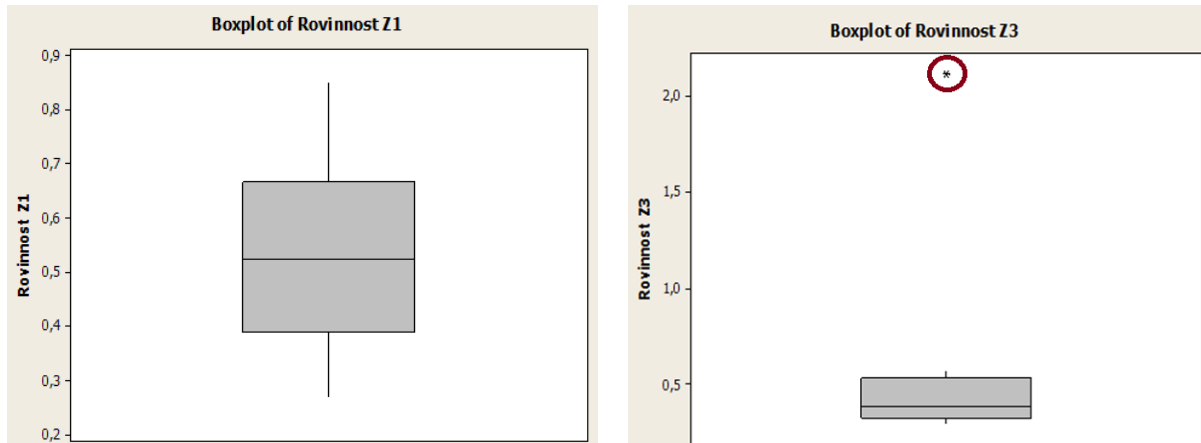
Rovinnost byla měřena pomocí 3D skeneru v podmínkách slévárny MAT. Rovinnost byla měřena u směsí č. 1–6 na celkem 24 odlitcích. Pro každou směs byly analyzovány 4 odlitky (8 kavit). Každá kavita měla 4 žebra. Jelikož bylo 8 kavit (4 odlitky), bylo tedy pro každou směs 32 hodnot rovinnosti (8 kavit x 4 žebra). Celkově bylo 6 směsí, tedy 192 měření rovinnosti (6 směsí x 32 měření na směs, Tab. 23).

Tab. 23 Souhrn počtu měření experimentu pro statistickou analýzu.

Položka	Počet	Popis
Počet směsí	6	
Počet odlitků na jednu směs	4	
Kavity na jeden odlitek	2	celkem 4 kavity na formu
Odlévané odlitky ve formě	2	
Počet kavit vyhodnocených na jednu směs	4	
Měření rovinnosti na jednu kavitu	8	
Celkový počet odlitků	24	6 směsí krát 4 odlitky
Měření rovinnosti na jednu směs	32	
Celkový počet měření rovinnosti	192	6 směsí krát 32 měření

7.5 Box plot (krabicový diagram – analýza hrubých chyb)

Jelikož máme k dispozici pouze 8 hodnot pro každou směs, nebyly použity testy pro detekci odlehlých hodnot (např. Grubbsův nebo Dixonův test), ale byla zvolena pouze jednodušší metoda box plot. Každý datový soubor (pro každou směs a každé jádro) byl pomocí box plotu otestován na přítomnost hrubých chyb. Příklad pro směs č. 1, žebro Z1 (nevyskytuje se žádná hrubá chyba) a žebro Z3 (vyskytuje se jedna hrubá chyba) je vyobrazen na následujícím obrázku (Obr. 64).



Obr. 64 Příklad box plotu ze směsi č. 1 pro žebra Z1 (vlevo) a Z3 (vpravo).

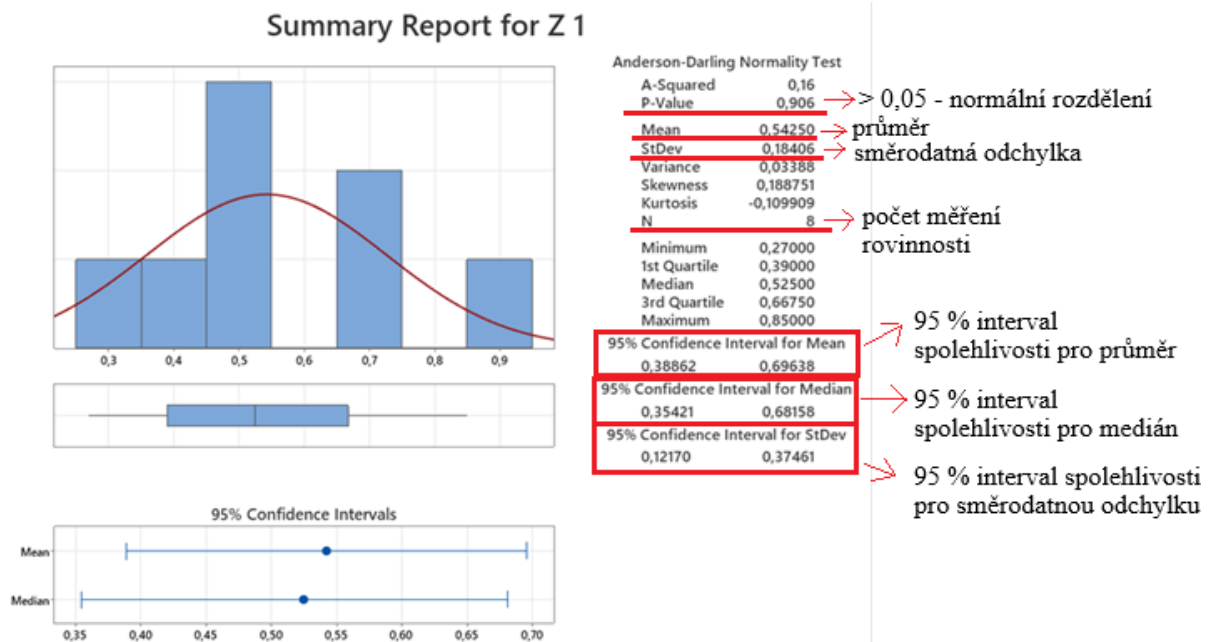
Na základě výsledků z box plotu byly ze souboru odstraněny hodnoty vykazující hrubé chyby. Z tohoto důvodu se u některých směsí pracovalo pouze se 7, v jednom případě dokonce jen se 6 hodnotami rovinnosti. Odstraněné hodnoty se výrazně odlišovaly od ostatních a byly považovány za odlehlé. Přehled počtu použitých hodnot rovinnosti pro statistické hodnocení jednotlivých směsí je uveden v následující tabulce (Tab. 24).

Tab. 24 Počet naměřených hodnot rovinnosti pro směs č. 1–6 po vyhodnocení hrubých chyb.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 [-]	8	8	6	7	8	8
Z2 [-]	8	8	7	8	8	8
Z3 [-]	7	7	8	8	8	7
Z4 [-]	7	8	7	8	7	8

7.6 Test normality (Summary report)

Normalita dat byla testována pomocí Anderson-Darlingova testu normality pomocí funkce Graphic Summary (výstupem byl Summary Report). Ukázalo se, že data pro směsi č. 1–6 a žebra Z1–Z4 mají normální rozdělení (viz Obr. 65). Z toho vyplývá, že v těchto případech na data působí pouze náhodné vlivy, a nevyskytují se zde systematické ani hrubé chyby. Na základě potvrzené normality bylo možné provést další statistickou analýzu v kterých je podmínkou, aby soubor hodnocených dat měl normální rozdělení. Příklad hodnocení funkce Graphic Summary (MINITAB) pro směs č. 1, žebro Z1 je uveden na obrázku (Obr. 65).



Obr. 65 Příklad statistické analýzy pro směs č. 1, žebro Z1.

Na obrázku (Obr. 65) je možné vidět, že pro směs č. 1, žebro Z1 se jedná o normální rozdělení, protože P-hodnota je větší jak 0,05. Dále je na obrázku (Obr. 65) vyznačen průměr (Tab. 33), směrodatná odchylka (Tab. 32), počet měření rovinnosti a příslušné intervaly spolehlivosti pro střední hodnotu, směrodatnou odchylku i medián.

7.6.1 Test na rovnost rozptylů (Leveneův test)

Na základě výsledků z rozboru normality (Summary Report) bylo zjištěno, že data mají normální rozdělení. To umožnilo provést další statistickou analýzu pomocí metody ANOVA (analýza rozptylu), která se používá ke zjištění, zda existují významné rozdíly mezi rozptyly ve více skupinách. V našem případě, zda existují statisticky významné rozdíly v rozptylech rovinností u jednotlivých přísad nebo natřených jader.

Jednou z podmínek použití ANOVY je právě normalita dat, proto byla předběžná analýza provedena v předchozí podkapitole [7.6 Test normality (Summary report)]. ANOVA byla následně aplikována zvláště na data každé směsi č. 1–6, přičemž byly porovnávány rozptyly mezi jednotlivými žebry Z1–Z4.

Při testování rovnosti rozptylů byl použit Leveneův test, který je vhodný pro posouzení rovnosti rozptylů i při menších odchylkách od normality. Z obrázku (Obr. 66) vyplývá, že nulová hypotéza předpokládá že všechny rozptyly jsou stejné a alternativní hypotéza, že jsou rozptyly rozdílné na dané hladině významnosti $\alpha = 0,05$ s pravděpodobností 95 %.

Č.1

Test for Equal Variances: Rovinnost versus Faktor

Method

Null hypothesis	All variances are equal
Alternative hypothesis	At least one variance is different
Significance level	$\alpha = 0,05$

Obr. 66 Přehled metod vyhodnocení Leveneova testu.

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

Faktor	N	StDev	CI
Z 1	8	0,184061	(0,0920742; 0,534975)
Z 2	8	0,126010	(0,0480942; 0,480026)
Z 3	7	0,091443	(0,0259241; 0,501493)
Z 4	7	0,168960	(0,0654964; 0,677668)

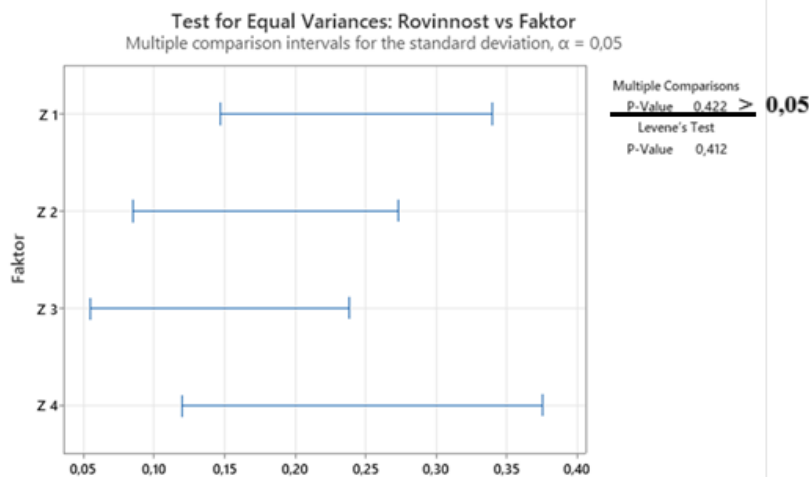
směrodatné odchylky spočítané pro všechny žebra

Individual confidence level = 98,75%

Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,422
Levene	0,99	0,412

žádný z obou testů nezamítá hypotézu o rovnosti rozptylů



Obr. 67 Test na rovnost rozptylů pro směs č. 1, žebra Z1–Z4.

Na obrázku (Obr. 66 a Obr. 67) je příklad Leveneova testu na rovnost rozptylů pro směs č. 1, žebra Z1 – Z4 kde P-hodnota je větší jak 0,05. To znamená, že nulová hypotéza se nezamítá. Proto rozptyly jsou stejné. Pokud je P-hodnota menší jak 0,05; to znamená že nulová hypotéza se zamítá a přijímá se alternativní hypotéza a tedy rozptyly jsou různé (daná směs má různý vliv na žebra Z1–Z4).

V následující tabulce (Tab. 25) jsou získané hodnoty z analýzy na rovnost rozptylů pro všechny směsi.

Tab. 25 Přehled P-hodnot z Leveneova testu u směsi č. 1–6 pro žebro Z1–Z4.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 – Z4	0,412	0,001	0,064	0,091	0,071	0,628

V pěti případech (Tab. 25) jsou P-hodnoty větší než 0,05, a proto se nulová hypotéza nezamítá. Pouze v jednom případě u směsi č. 2 je P-hodnota menší než 0,05 (v Tab. 25 je označena červenou barvou), takže se přijímá alternativní hypotézu o rozdílných rozptylech.

Vzhledem k rozdílné tloušťce žeber se předpokládá, že rozptyly budou odlišné. Je proto vhodné porovnávat jednotlivé směsi samostatně pro každé žebro Z1–Z4. Na základě Leveneova testu lze konstatovat, že mezi žebry Z1 a Z4 nejsou statisticky významné rozdíly. Vzhledem k tomu, že výsledky neodpovídaly očekávání, byl dále proveden test rovnosti středních hodnot podle Tukeyho a Fishera.

7.6.2 Test na rovnost středních hodnot (Tukeyho a Fisherův test)

TUKEYHO TEST

Byl proveden Tukeyho test, který navazuje na ANOVU a slouží k podrobnějšímu porovnání středních hodnot mezi jednotlivými skupinami. Tukeyho test umožňuje zjistit na základě rozdílu středních hodnot odchylky mezi jednotlivými žebry dané směsi. Tento test rovnosti středních hodnot rovinnosti se provedl u každé směsi, přičemž zkoumaná žebra Z1–Z4 byla mezi sebou vzájemně porovnána.

P-hodnota větší jak 0,05 znamená, že nulová hypotéza se nezamítá, proto i střední hodnoty jsou stejné. Pokud je P-hodnota menší jak 0,05; což znamená že nulová hypotéza se zamítá a přijímá se alternativní hypotéza a tedy střední hodnoty jsou různé.

Výstup z analýzy na rovnost středních hodnot u směsi č. 1 pro žebra Z1–Z4 (Obr. 68):

Č.1

One-way ANOVA: Rovinnost versus Faktor

Method

Null hypothesis	All means are equal
Alternative hypothesis	Not all means are equal
Significance level	$\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels Values
Faktor	4 Z 1; Z 2; Z 3; Z 4

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,148033	27,41%	19,03%	3,63%

Means

Faktor	N	Mean	StDev	95 % CI
Z 1	8	0,5425	0,1841	(0,4349; 0,6501)
Z 2	8	0,5375	0,1260	(0,4299; 0,6451)
Z 3	7	0,3943	0,0914	(0,2793; 0,5093)
Z 4	7	0,3514	0,1690	(0,2364; 0,4664)

↑
střední hodnoty

↑
intervaly spolehlivosti
středních hodnot

Pooled StDev = 0,148033

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Faktor N Mean Grouping

Z 1	8 0,5425 A
Z 2	8 0,5375 A
Z 3	7 0,3943 A
Z 4	7 0,3514 A

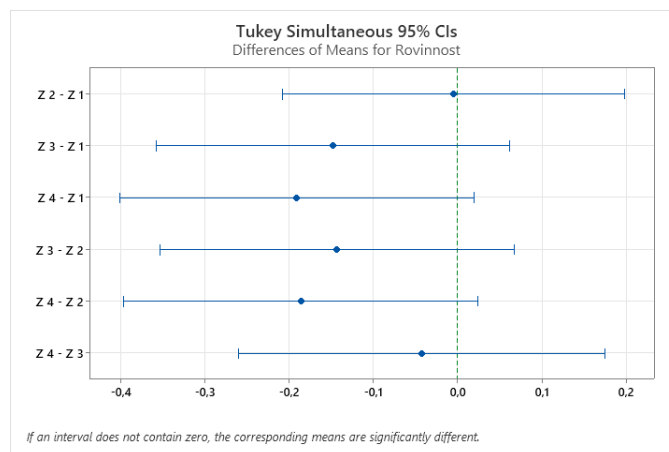
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95 % CI	T-Value	Adjusted P-Value
Z 2-Z 1	-0,0050	0,0740	(-0,2081; 0,1981)	-0,07	1,000
Z 3-Z 1	-0,1482	0,0766	(-0,3584; 0,0620)	-1,93	0,239
Z 4-Z 1	-0,1911	0,0766	(-0,4013; 0,0191)	-2,49	0,085
Z 3-Z 2	-0,1432	0,0766	(-0,3534; 0,0670)	-1,87	0,265
Z 4-Z 2	-0,1861	0,0766	(-0,3963; 0,0241)	-2,43	0,096
Z 4-Z 3	-0,0429	0,0791	(-0,2599; 0,1742)	-0,54	0,948

naměřené P-hodnoty

Individual confidence level = 98,91%



Obr. 68 Tukeyho test na rovnost středních hodnot u směsi č. 1, žebra Z1–Z4.

U směsi č. 1 (Obr. 68) byly střední hodnoty rovinnosti srovnávány pomocí Tukeyho testu, přičemž byly dosaženy podobné závěry jako v případě Leveneova testu rozptylů.

Tab. 26 Přehled P-hodnot z Tukeyho testu u směsi č. 1–6 pro žebro Z1–Z4.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 – Z2	1,00	0,99	1,00	0,57	0,61	0,97
Z1 – Z3	0,24	0,75	0,80	0,09	0,39	0,61
Z1 – Z4	0,09	0,39	0,94	1,00	1,00	0,96

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z2 – Z3	0,27	0,89	0,83	0,65	0,98	0,85
Z2 – Z4	0,09	0,24	0,91	0,51	0,61	0,79
Z3 – Z4	0,95	0,07	0,43	0,07	0,40	0,34

U Tukeyho testu byly všechny P-hodnoty vyšší než 0,05 (Tab. 26), což značí, že nulová hypotéza o rovnosti středních hodnot se nezamítá. To znamená, že mezi středními hodnotami rovinnosti jednotlivých žebřer Z1–Z4 nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. Tedy změna tloušťky žebra nemá vliv na změnu středních hodnot rovinností.

FISHERŮV TEST

Jelikož předchozí test neprojevil významné odchylky mezi jednotlivými žebřery, proto byl dále proveden Fisherův test pro rovnost středních hodnot. P-hodnota větší jak 0,05 znamená, že nulová hypotéza se nezamítá. Proto střední hodnoty jsou stejné. Pokud je P-hodnota menší jak 0,05; to znamená že nulová hypotéza se zamítá a přijímá se alternativní hypotéza a tedy střední hodnoty jsou různé.

Záznam Fisherova testu pro rovnost středních hodnot u směsi č. 1, žebra Z1–Z4 (Obr. 69):

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Faktor	N	Mean	Grouping
Z 1	8	0,5425	A
Z 2	8	0,5375	A
Z 3	7	0,3943	B
Z 4	7	0,3514	B

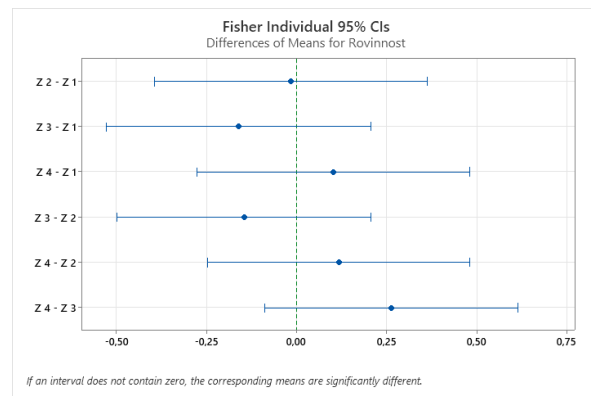
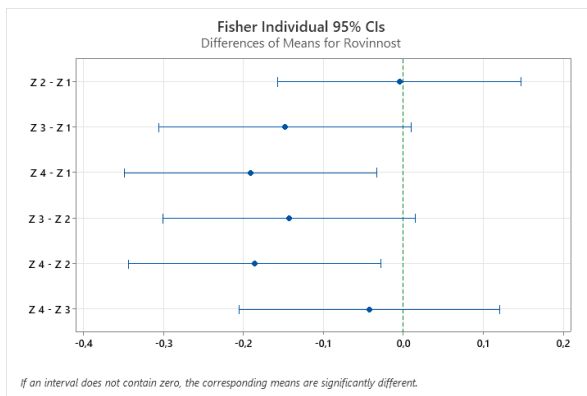
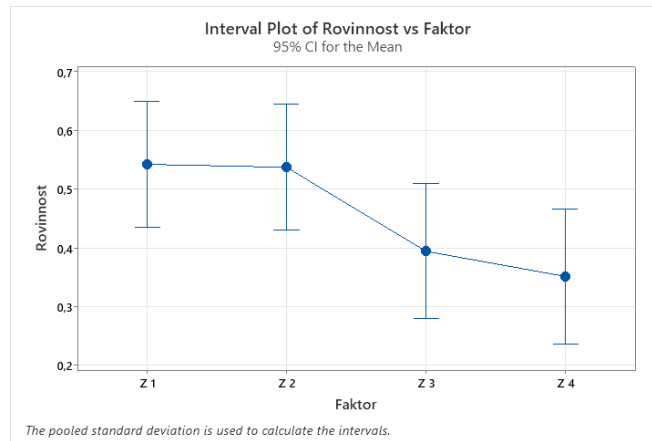
Means that do not share a letter are significantly different.

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95 % CI	T-Value	Adjusted P-Value
Z 2–Z 1	-0,0050	0,0740	(-0,1571; 0,1471)	-0,07	0,947
Z 3–Z 1	-0,1482	0,0766	(-0,3057; 0,0093)	-1,93	0,064
Z 4–Z 1	-0,1911	0,0766	(-0,3486; -0,0336)	-2,49	0,019
Z 3–Z 2	-0,1432	0,0766	(-0,3007; 0,0143)	-1,87	0,073
Z 4–Z 2	-0,1861	0,0766	(-0,3436; -0,0286)	-2,43	0,022
Z 4–Z 3	-0,0429	0,0791	(-0,2055; 0,1198)	-0,54	0,593

zamítá se nulová hypotéza o rovnosti středních hodnot

Obr. 69 Fisherův test na rozdíl středních hodnot pro směs č. 1, žebra Z1–Z4.

Intervaly spolehlivosti ukázaly, že mezi žebřery Z1 a Z2 se nulová hodnota v žádném z intervalů nevyskytuje. To naznačuje, že větší tloušťky (Z1, Z2) mají v tomto případě statisticky významně vyšší střední hodnoty než u ostatních žebřer (Z3, Z4). Výsledky tak neodpovídají závěru Tukeyho testu, který žádné významné rozdíly středních hodnot mezi jednotlivými žebřery nezaznamenal (Obr. 69).



Obr. 70 Fisherův test rovnosti středních hodnot pro směs č. 1 (vlevo) a směs č. 3 (vpravo), žebra Z1–Z4.

Na obrázku (Obr. 70 vlevo) je záznam Fisherova testu, kde je vidět, že žebra Z1 a Z2 pro směs č. 1 mají statisticky významně vyšší průměr rovinnosti oproti žebro Z4 (P-hodnoty 0,019 a 0,022). Zatímco směs č. 3 (Obr. 70 vpravo) vykazuje stejný vliv na žebra 1–4. To znamená, že neexistuje statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami u daných žeber u směsi č. 3. Z toho vyplývá, že na hodnotu rovinnosti nemá vliv pouze tloušťka žebra, ale působí zde i další faktory. S přihlédnutím k tomu, že se u směsi č. 3 neprojevil vliv různé tloušťky, lze usuzovat, že tento vliv byl do určité míry potlačen. To zároveň naznačuje, že za daných podmínek nebyl u směsi č. 3, 4 a 5 prokázán příznivý účinek přísady na hodnotu rovinnosti (hodnoty rovinnosti často výrazně překročují povolenou hodnotu).

Následující tabulka (Tab. 27) ukazuje, která žebra byla na základě Fisherova testu vyhodnocena jako statisticky odlišná v porovnání s ostatními žebry u jednotlivých směsí. Červená barva znamená, že P-hodnota je menší než 0,05 u daného testu z hlediska rovinnosti a tedy, že neplatí rovnost středních hodnot dle Fisherova testu.

Tab. 27 Přehled výsledků z Fisherova testu na rovnost středních hodnot u směsi č. 1–6, žebro Z1–Z4.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 – Z2	0,95	0,77	0,93	0,21	0,23	0,66
Z1 – Z3	0,06	0,32	0,37	0,02	0,12	0,22
Z1 – Z4	0,02	0,12	0,58	0,96	0,97	0,63
Z2 – Z3	0,07	0,48	0,40	0,25	0,71	0,42
Z2 – Z4	0,02	0,07	0,51	0,17	0,23	0,36
Z3 – Z4	0,59	0,02	0,14	0,02	0,12	0,09

Z tabulky (Tab. 27) je možné vidět, že nejvíce se odlišovalo žebro Z4 u směsi č. 1 a č. 4, které představuje nejtenčí žebro ve zkušebním odlitku. Výsledek naznačuje, že různé směsi se na tomto konkrétním žebro projevují odlišně, což může souviset s jeho geometrií, ale i s dalším parametrem.

Shrnutí výše uvedených testů dle analýzy ANOVA rozptylu a Tukeyho testu nejsou rozdíly v žebrech statisticky významné u směsi č. 1–4. Dle Fishera u některých směsí a žebor naopak jsou různá. Z toho plyne, že je nutno v dalších testech vycházet ze srovnání různých směsí vždy samostatně pro jednotlivá žebra.

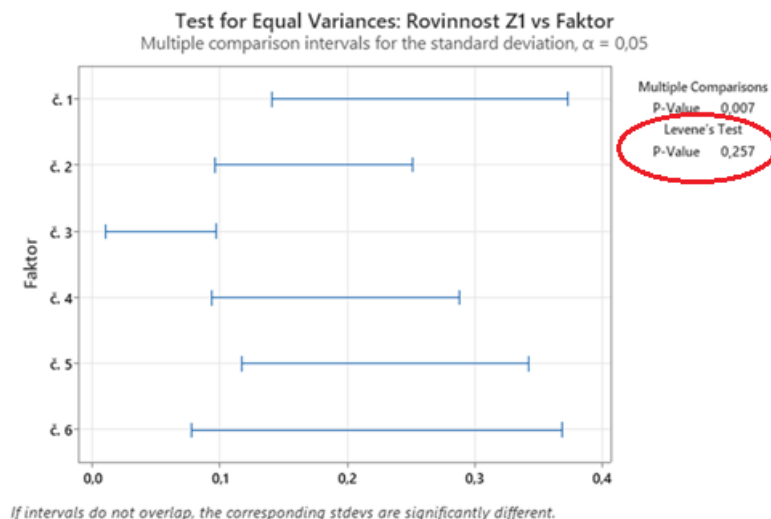
Tento vztah neplatí ve všech případech, ale obecně mají žebra s menší tloušťkou nižší penetraci, což odpovídá předpokladu. V některých případech se však toto chování neprojevilo, což může být způsobeno buď tím, že směs neúčinkovala za daných podmínek, nebo výsledky rovinnosti byly ovlivněny také dalšími vlivy.

7.6.3 Statistické porovnání přínosu jednotlivých směsí

V následující kapitole jsou porovnávány jednotlivé směsi mezi sebou. Při tomto porovnání byla použita stejná metodika vyhodnocení jako v předchozí podkapitole (7.3 Statistické vyhodnocení). Doposud byl vliv na hodnotu rovinnosti zkoumán vždy samostatně pro každé žebro Z1–Z4. Z provedeného statistického vyhodnocení však vyplývá, že pro porovnání směsí je nezbytné srovnávat výsledky vždy v rámci jednoho konkrétního žebra, jak bylo výše uvedeno. Z tohoto důvodu byly následně provedeny nové statistické analýzy, konkrétně ANOVA, Tukeyho test, Fisherův test a Leveneův test, s cílem vyhodnotit přínos jednotlivých směsí mezi sebou.

TEST NA ROVNOST ROZPTYLŮ - LEVENEŮV TEST

Leveneův test na rovnost rozptylů byl proveden stejným způsobem jako v podkapitole [7.6.1 Test na rovnost rozptylů (Leveneův test)], kde je uveden příklad vyhodnocení tohoto testu. Příklad Leveneova testu na rovnost rozptylů pro žebro Z1, směs č. 1–6 je na obrázku (Obr. 71). V tomto případě je P-hodnota větší jak 0,05, a proto nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti rozptylů. Výsledky Leveneova testu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 28) pro jednotlivá žebra Z1–Z4 u směsí č. 1–6.



Obr. 71 Test na rovnost rozptylů pro žebro Z1, směs č. 1–6.

V tabulce (Tab. 28) jsou červeně označeny hodnoty, u nichž byla zamítnuta nulová hypotéza o rovnosti rozptylů rovinnosti.

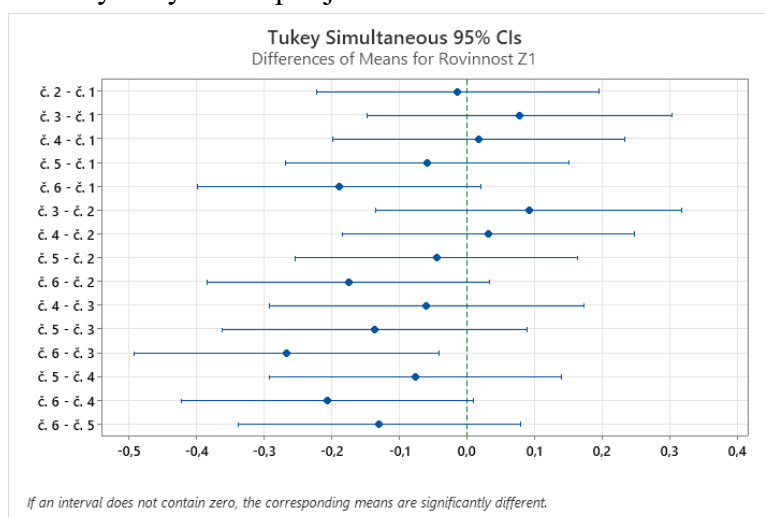
Tab. 28 Leveneův test pro žebra Z1 – Z4, směs č. 1–6.

	Z1	Z2	Z3	Z4
č. 1 – č. 6	0,26	0,02	0,01	0,13

Podle Leveneova testu pro žebro Z1 a Z4 (Tab. 28) nulovou hypotézu nezamítáme, protože P-hodnoty jsou vyšší než 0,05. To naznačuje, že tato dvě žebra se chovají podobně. Jinými slovy, směsi č. 1 až 6 mají na jejich rovinnost srovnatelný vliv. Naopak u žebřer Z2 a Z3 nulovou hypotézu zamítáme, což znamená, že směsi č. 1–6 ovlivňují tato žebra odlišně a dosahují statisticky významně nižší hodnoty rozptylu rovinnosti. V těchto případech tedy platí alternativní hypotéza.

TEST NA ROVNOST STŘEDNÍCH HODNOT – TUKEYHO TEST

Tukeyho test pro rovnost středních hodnot byl proveden stejným způsobem jako v podkapitole [7.6.2 Test na rovnost středních hodnot (Tukeyho a Fisherův test)], kde je uveden jeho popis. Příklad Tukeyho testu na rovnost středních hodnot pro žebro Z1, směs č. 1–6 je na obrázku (Obr. 72). V tomto případě platí mezi směsí č. 3 a směsí č. 6 (s nátěrem) u žebra Z1 alternativní hypotéza. To znamená, že jejich střední hodnoty se statisticky významně liší. Rozdíl mezi směsí č. 3 a směsí č. 6 může být způsoben například tím, že u žebra Z1 směs č. 3 nebyla za daných podmínek účinná. Následující tabulka (Tab. 29) obsahuje přehled získaných výsledků pro jednotlivá žebra Z1–Z4 u směsi č. 1–6.



Obr. 72 Tukeyho test na rovnost středních hodnot pro žebro Z1, směs č. 1–6.

V tabulce (Tab. 29) jsou červeně označeny hodnoty, u nichž byla zamítnuta nulová hypotéza o rovnosti středních hodnot rovinnosti.

Tab. 29 Přehled výsledků Tukeyho testu pro Z1 – Z4, směs č. 1–6.

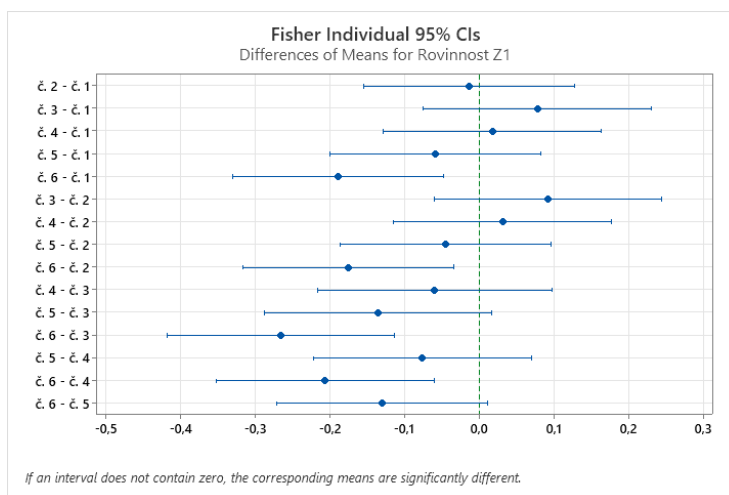
	Z1	Z2	Z3	Z4
č. 1 – č. 2	1,00	1,00	1,00	0,34
č. 1 – č. 3	0,91	0,99	0,99	0,32
č. 1 – č. 4	1,00	0,33	0,01	0,86
č. 1 – č. 5	0,96	0,80	0,26	0,98
č. 1 – č. 6	0,09	0,70	0,99	1,00
č. 2 – č. 3	0,83	0,98	1,00	1,00

	Z1	Z2	Z3	Z4
č. 2 – č. 4	0,99	0,20	0,01	0,94
č. 2 – č. 5	0,99	0,63	0,32	0,77
č. 2 – č. 6	0,15	0,85	0,98	0,40
č. 3 – č. 4	0,97	0,64	0,01	0,92
č. 3 – č. 5	0,47	0,97	0,41	0,74
č. 3 – č. 6	0,01	0,45	0,92	0,38
č. 4 – č. 5	0,90	0,97	0,59	0,99
č. 4 – č. 6	0,07	0,01	0,01	0,92
č. 5 – č. 6	0,44	0,09	0,07	0,99

Podle výsledků Tukeyho testu (Tab. 29) se u žebra Z2 odlišně chovala směs č. 4. U žebra Z3 bylo zjištěno odlišné chování převážně u směsi č. 4. Naopak u žebra Z4 nebyly mezi směsmi zjištěny významné rozdíly, což naznačuje, že všechny směsi na něj působí podobně. Tento test tedy ukázal, že největší rozdíly mezi směsmi se projevují u žebra Z1, Z2 a Z3. Podobný závěr přinesl i Leveneův test, kde byla pro žebro Z2 a Z3 rovněž zamítnuta nulová hypotéza. Z testu vyplývá, že jsou statisticky významné rozdíly u žebra Z1, Z2, Z3 ze směsi č. 1, 2, 3 a 6 vůči žebro Z4 u jednotlivých směsí.

TEST NA ROVNOST STŘEDNÍCH HODNOT – FISHERŮV TEST

Fisherův test pro rovnost středních hodnot byl proveden stejně jako v podkapitole [7.6.2 Test na rovnost středních hodnot (Tukeyho a Fisherův test)], kde je popsán jeho postup. Příklad Fisherova testu na rovnost středních hodnot pro žebro Z1, směs č. 1–6 je na obrázku (Obr. 73). V tomto případě vykazují směsi č. 1, 2, 3 a 4 u žebra Z1 odlišné výsledky ve srovnání se směsí č. 6. Na rozdílné chování může mít vliv kromě dané přísady nebo nátěru také samotná tloušťka žebra. Následující tabulka (Tab. 30) uvádí přehled získaných hodnot pro jednotlivá žebra Z1–Z4 u směsí č. 1–6.



Obr. 73 Fisherův test na rovnost středních hodnot pro žebro Z1, směs č. 1–6.

V tabulce (Tab. 30) jsou červeně označeny hodnoty, u nichž byla zamítnuta nulová hypotéza o rovnosti středních hodnot rovinnosti.

Tab. 30 Přehled výsledků Fisherova testu pro Z1 – Z4, směs č. 1–6.

	Z1	Z2	Z3	Z4
č. 1 – č. 2	0,85	0,78	0,91	0,05
č. 1 – č. 3	0,31	0,66	0,73	0,05
č. 1 – č. 4	0,81	0,05	0,01	0,26
č. 1 – č. 5	0,40	0,21	0,03	0,49
č. 1 – č. 6	0,01	0,16	0,54	0,86
č. 2 – č. 3	0,23	0,48	0,81	0,92
č. 2 – č. 4	0,67	0,02	0,01	0,36
č. 2 – č. 5	0,52	0,13	0,04	0,20
č. 2 – č. 6	0,02	0,25	0,47	0,06
č. 3 – č. 4	0,44	0,13	0,1	0,32
č. 3 – č. 5	0,08	0,44	0,06	0,18
č. 3 – č. 6	0,01	0,07	0,32	0,06
č. 4 – č. 5	0,30	0,43	0,11	0,68
č. 4 – č. 6	0,01	0,01	0	0,33
č. 5 – č. 6	0,07	0,01	0,01	0,59

Byly zaznamenány rozdíly (Tab. 30) mezi směsí č. 1 a směsmi č. 2, 3, 4 a 5, vůči nimž dosahovala směs č. 1 lepších výsledků. Naopak směs č. 1 vykazovala vyšší střední hodnotu ve srovnání se směsí č. 6. Celkově směs č. 6 dosahovala statisticky významně lepších výsledků oproti směsím č. 1, 2, 3, 4 a 5. Dále byla zjištěna statisticky významně vyšší rovinnost žeber u odlitků ze směsi č. 2 nad odlitky ze směsi č. 4 a 5.

Například u žebra Z4 se statisticky významně liší směsi č. 1 a 2, zatímco ostatní směsi se u tohoto žebra Z4 navzájem významně neliší. Ze zhodnocení vyplývá následující pořadí směsí z hlediska rovinnosti: nejlepší výsledky dosahuje směs č. 6, následují směsi č. 1 a 2, a nakonec směsi č. 3, 4 a 5, které jsou statisticky mezi sebou srovnatelné.

7.7 Závěr ze statistického vyhodnocení

V podkapitole (7.3 Statistické vyhodnocení) byly nejprve provedeny testy na odhalení hrubých chyb pomocí box plotu. Následně byl proveden test normality (Graphic Summary), který ověřil, zda mají data normální rozdělení. Jelikož byla normalita potvrzena, bylo možné pokračovat v ANOVA analýze zaměřené na zjištění rovnosti rozptylů a středních hodnot rovinnosti.

Podle Leveneova testu nemělo použití přísad vliv na rozptyly. Ty byly u všech směsí a jednotlivých žeber za daných experimentálních podmínek (např. lící teplota, složení kovu...) statisticky srovnatelné. Jinými slovy, vliv směsi se v rozptylech výsledků rovinnosti neprojevil. Naopak, jak ukázaly Tukeyho a zejména Fisherův test, u středních hodnot již ke statisticky významným rozdílům docházelo. Tyto testy dále naznačily, že se v jednotlivých případech začal projevovat vliv jak tloušťky žeber, tak samotných směsí.

Zatímco u některých žeber byly střední hodnoty mezi směsmi srovnatelné, u jiných se projevil významné rozdíly. To naznačuje, že v některých případech přísada buď potlačila

vliv tloušťky, nebo naopak vůbec neovlivnila pronikání kovu do formovací směsi. Například pokud všechna žebra vykazovala u dané směsi podobné střední hodnoty i rozptyl, znamená to, že nebyl prokázán statistický rozdíl v rozptylech, ani ve středních hodnotách. To by mohlo naznačovat absenci vlivu tloušťky žebra. Nicméně zda všechny střední hodnoty byly vysoké, lze usoudit, že přísada za daných podmínek jednoduše nezafungovala.

Z pohledu statistických testů se jako nejstabilnější jeví směs č. 2, která nevykazovala výrazné odchylky a působila konzistentně napříč všemi žebry. U směsi č. 6 bylo zjištěno, že dosahuje statisticky významně odlišných středních hodnot, a to u některých žebra, v porovnání s ostatními směsmi. Proto směs č. 6 dosáhla v praxi nejlepších výsledků (měla nejvyšší počet vyhovujících kusů). Mezi jednotlivými žebry vykazovalo největší citlivost žebro Z3, které bylo nejvíce ovlivněno rozdíly mezi směsmi ve všech testech.

Z hlediska konstrukce se očekávalo, že s rostoucí tloušťkou žebra poroste i míra penetrace, protože silnější žebra tuhnou pomaleji. Tento předpoklad však nebyl jednoznačně potvrzen. Rozdíly mezi jednotlivými žebry se projevíly pouze částečně. Naopak největší odchylky byly zaznamenány u tenkého žebra Z3, kde se očekávala nižší míra penetrace díky rychlejšímu tuhnutí. To naznačuje, že průběh penetrace závisí i na dalších faktorech mimo samotnou tloušťku žebra.

Vliv ochranného nátěru se ukázal jako velmi pozitivní. Vzorky s nátěrem měly statisticky nižší hodnoty penetrace. Na základě těchto výsledků lze doporučit použití nátěru jako jedno z účinných opatření ke snížení výskytu penetrace.

Pro důkladné potvrzení závěrů by bylo vhodné provést další experimenty s větším souborem dat, které by zohlednily i jiné možné ovlivňující faktory, jako je např. doba lití, lící teplota.

7.8 Analýza shody a rozptylu

Po provedení statistické analýzy pomocí statistických nástrojů byly získány určité výsledky. Pro jejich ověření byl vyhodnocen počet shodných zkušebních kusů, porovnána směrodatná odchylka naměřených hodnot rovinnosti a také jejich střední hodnoty.

7.8.1 Procentuální vyjádření shodných výrobků

Z naměřených hodnot rovinnosti pro každou směs a každé žebro byl následným výpočtem určen počet shodných kusů nepřesahující hodnotu rovinnosti 0,50 u jednotlivých směsí pro žebra Z1 až Z4. Tyto hodnoty byly poté převedeny na procenta (7.1). Nakonec ze čtyř žebra byla vypočítána průměrná hodnota pro srovnání mezi směsmi.

Výpočet pro hodnotu např. pro Z1, směs č. 1 byl obdržán následujícím způsobem:

$$Z1 = \frac{n_1}{n} * 100 = 62,5 [\%] \quad (7.1)$$

Kde:

Z1	příslušné žebro	[%]
n_1	počet vyhovujících hodnot splňující podmínku rovinnosti < 0,50 (pro Z1 $n_1 = 5$)	[-]
n	celkový počet naměřených hodnot (n=8)	[-]

Tabulka (Tab. 31) porovnáva průměrnou hodnotu rovinnosti žebra Z1 až Z4 u směsí č. 1–6, které nepřesahují předepsanou hodnotu rovinnosti 0,50. Nejlepší výsledky v počtu shodných výrobků vykazuje směs č. 6, tj. jádra opatřená nátěrem.

Například u směsi č. 1 a žebra Z1–Z4 bylo provedeno 8 měření, z nichž 3 byla vyhovující a 5 nevyhovujících. U žebra Z1 bylo vyhodnoceno 62,5 %, tedy 5 shodným kusům z 8. Stejně

hodnoty byly zjištěny i u žebra Z2. U žebra Z3 a Z4 byla zjištěna shoda v 6 případech, což odpovídá 75 %. Na základě těchto údajů byla vypočtena průměrná hodnota rovinnosti pro směs 1, která činí 69 %. Stejným způsobem byly stanoveny i další hodnoty uvedené v tabulce (Tab. 31).

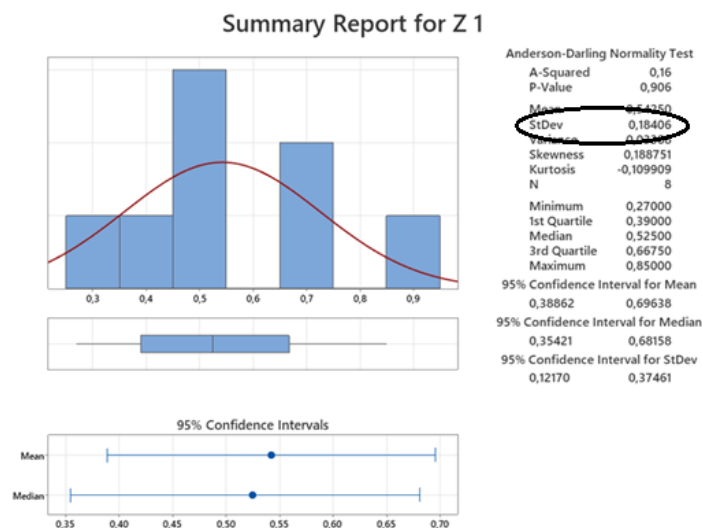
Tab. 31 Procentuální vyjádření shodných výrobků u žebíř Z1-Z4, směs č. 1-6.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 [%]	62,5	37,5	12,5	37,5	50	87,5
Z2 [%]	62,5	62,5	25	37,5	25	100
Z3 [%]	75	87,5	62,5	37,5	50	87,5
Z4 [%]	75	50	50	50	50	100
Průměr [%]	69	60	37,5	41	44	94
Pořadí	2	2	3	3	3	1

U směsi s použitím aditiv dosáhla dobrých výsledků směs č. 1, následovaná směsí č. 2. Ostatní aditiva měla vyšší počet neshodných kusů než 50 % přesahujících hodnotu rovinnosti 0,50. Z toho důvodu byla hodnocena dle pořadí směsi č. 3, 4 a 5 číslem 3.

7.8.2 Porovnání směrodatné odchylky rovinnosti

V následující tabulce (Tab. 32) byla porovnána směrodatná odchylka naměřených hodnot rovinnosti (32 hodnot pro každou směs) pro směs č. 1–6 u žebíř Z1–Z4, která byla získána ze základní statistické analýzy v programu Minitab (Summary Report, Obr. 74). Na obrázku (Obr. 74) je vyobrazen Summary Report pro žebro Z1 pro směs č. 1. Z obdržených hodnot ze statistické analýzy byly vypočítané průměrné hodnoty směrodatné odchylky pro 4 žebra u směsi č. 1–6. Ty následně byly porovnány mezi sebou. Vyšší průměrné hodnoty směrodatné odchylky značí větší rozptýl v hodnotách rovinnosti zkušebního odlišku. Pro praxi naopak je výhodné, aby byly hodnoty rozptýlů rovinnosti co nejnižší.



Obr. 74 Příklad statistického výstupu (Summary Report) z Minitabu.

Tab. 32 Porovnání směrodatné odchylky rovinnosti u směsi č. 1-6 pro jednotlivá žebra.

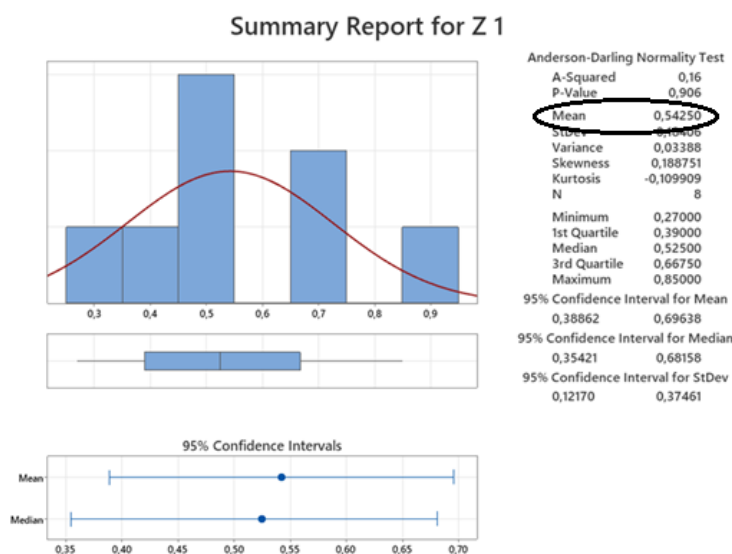
	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 [-]	0,18	0,13	0,02	0,13	0,16	0,14
Z2 [-]	0,13	0,15	0,11	0,53	0,39	0,11
Z3 [-]	0,09	0,08	0,14	0,55	0,60	0,06

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z4 [-]	0,17	0,37	0,63	0,25	0,20	0,15
Průměr [%]	0,14	0,18	0,22	0,37	0,33	0,12
Pořadí	2	2	3	3	3	1

Z tabulky (Tab. 32) porovnávající směrodatnou hodnotu, kde je cílem dosáhnout co nejmenší hodnoty, vychází jako nejlepší opět směs č. 6 s nátěrem. Nicméně směs č. 1, která má mírně nižší směrodatnou odchylku než směs č. 2 vykazuje také nízké hodnoty směrodatné odchylky. Ostatní směsi označené číslem 3, které vykazovaly vyšší směrodatnou odchylku, byly vyhodnoceny jako nejméně vyhovující.

7.8.3 Porovnání střední hodnoty rovinnosti

V následující tabulce (Tab. 33) byla porovnána střední hodnota naměřených hodnot rovinnosti (32 hodnot pro každou směs) pro směs č. 1–6 u žebor Z1–Z4, která byla získána ze základní statistické analýzy v programu Minitab (Summary Report, Obr. 75). Na obrázku (Obr. 75) je vyobrazen Summary Report pro žebro Z1, směs č. 1. Z obdržných hodnot ze statistické analýzy byly vypočítané průměrné hodnoty střední hodnoty pro 4 žebra u směsí č. 1–6. Ty následně byly porovnány mezi sebou. Vyšší průměrné hodnoty střední hodnoty nad hodnotu 0,50 značí nevyhovující rovinnost zkušebního odlitku, zatímco nižší hodnoty pod hodnotu 0,50 jsou žádoucí.



Obr. 75 Příklad statistického výstupu (Summary Report) z Minitabu.

Tab. 33 Porovnání středních hodnot rovinnosti u žebor Z1–Z4, směs č. 1–6.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
Z1 [-]	0,54	0,53	0,62	0,56	0,48	0,35
Z2 [-]	0,54	0,50	0,60	0,84	0,72	0,33
Z3 [-]	0,39	0,42	0,46	1,08	0,79	0,28
Z4 [-]	0,35	0,70	0,72	0,55	0,48	0,38
Průměr [%]	0,46	0,54	0,60	0,76	0,62	0,34
Pořadí	2	2	3	3	3	1

Porovnání střední hodnoty rovinnosti u směsí č. 1–6 (Tab. 33) ukázalo, že výsledky s nátěrem (směs č. 6) nepřekročily u žádného žebra stanovenou limitní hodnotu rovinnosti 0,50.

Průměrná hodnota směsi č. 1 také zůstala pod tímto limitem, přičemž pouze dvě hodnoty mírně přesáhly stanovenou limitní hodnotu rovinnosti. Tak lze výsledky směsi č. 2 považovat za uspokojivé. Nicméně ostatní směsi hodnocené číslem 3, které vykazovaly vyšší střední hodnotu, byly kvalifikovány jako nejméně vyhovující.

7.8.4 Závěr analýzy shody a rozptylu

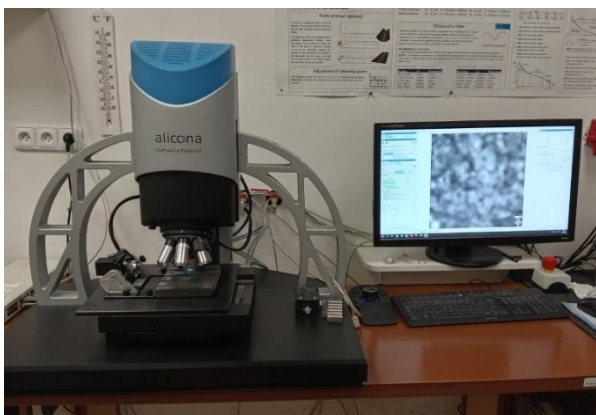
Výsledky získané porovnáním počtu shodných kusů, směrodatných odchylek a středních hodnot rovinnosti potvrdily závěry uvedené v předchozí podkapitole (7.3 Statistické vyhodnocení). Nejlepších výsledků, pro zamezení vzniku penetrace dosáhla jádra, opatřená vodním ochranným nátěrem. Uspokojivé výsledky vykazovaly rovněž směsi č. 1 a č. 2, které by bylo možné dále využít při dalším testování v provozních podmínkách.

Lze doporučit pokračovat v testování směsi č. 1 a 2, které vykazaly statisticky významnější přínos ve srovnání se směsmi č. 3, 4 a 5. Zároveň je vhodné rozšířit datový soubor. Proto by bylo vhodné provést další měření s více než osmi hodnotami, aby byla zajištěna vyšší spolehlivost statistického vyhodnocení.

7.9 Měření drsnosti povrchu zkušebního odlitku

Měření drsnosti povrchu a rozřezání vzorků bylo provedeno na VUT v Brně. Měření drsnosti proběhlo bezkontaktní metodou pomocí optického mikroskopu Alicona Infinite Focus při zvětšení povrchu odlitku 10 x (Obr. 76).

Optický 3D měřicí systém Alicona využívá metodu "Focus Variation", která kombinuje vertikální skenování s malou hloubkou ostrosti a rekonstrukci 3D obrazu z velkého množství 2D snímků. Tento systém umožňuje vysoce přesné topografické měření povrchů, včetně analýzy drsnosti a tvaru součástí s vysokým rozlišením. Díky bezdotykové technologii lze měřit i strmé stěny (až do 80°) a získávat barevné snímky s vysokým kontrastem a hloubkou ostrosti. [99]



Obr. 76 Měření zkušební vzorku pomocí bezdotykového optického mikroskopu Alicona.

Na následujícím obrázku (Obr. 77) je zobrazen zkušební odlitek z kavity č. 1, který byl rozřezán pásovou pilou na dvě poloviny (Obr. 78), aby bylo možné zkoumat a měřit drsnost povrchu zkušební odlitku pomocí výše popsaného optického mikroskopu.



Obr. 77 Odlitý zkušební vzorek.



Obr. 78 Rozříznutý zkušební odlitek na dvě části.

Bylo provedeno jedno měření na žebro Z1 na 6 odlitcích z kavity č. 1 (upravena pomocí L-filtru, Obr. 79). Účelem bylo srovnání drsnosti povrchu u všech šesti odlitků dle normy ČSN ISO řady 21920 a 4287 [100; 101]. Na zbývajících třech žebrech drsnost povrchu nebyla vyhodnocena. Na zkušebním vzorku o rozměrech 18×12 mm bylo vždy změřeno pole o velikosti 16 mm na žebro Z1, a to celkově jednou. Pro vyhodnocení výsledků byl použit Gaussův L – filtr (dle normy ČSN EN ISO 16610-31 [102]) s hodnotou 8 mm.

L-filtr slouží k potlačení značných složek S-F povrchu, nebo základního povrchu. Jeho použití vede k vytvoření S-L povrchu. [102]

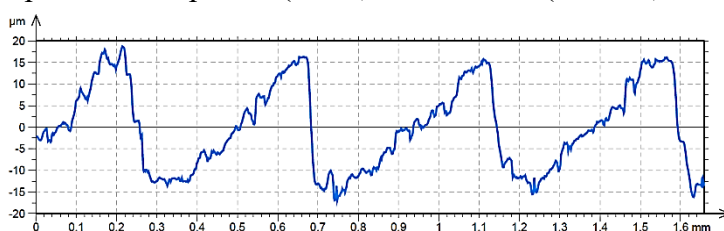


Obr. 79 Rozvržení měření na rozřezaném zkušební vzorku směs č.1.

Tato práce je zaměřena především na R-parametry drsnosti povrchu, konkrétně na hodnoty R_p , R_v , R_z a R_a . R-parametry (profilové parametry) popisují drsnost povrchu na základě 2D profilu, který je získán řezem povrchu v jednom směru.

Kromě nich existují také P-parametry, které vycházejí z primárního profilu a poskytují podobné informace jako R-parametry, avšak před aplikací filtrace. P-parametry tedy zahrnují i vlivy vlnitosti a celkového tvaru povrchu. Ostatní R-parametry a všechny P-parametry jsou uvedeny v příloze 1–6.

Základní profil (primary profile) je úplný profil, který dostaneme po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s [102] (Obr. 80). Jeho parametry charakterizují odchylky od geometrického tvaru v přenosovém pásmu (λ_s - λ_f), viz obrázek (Obr. 83).

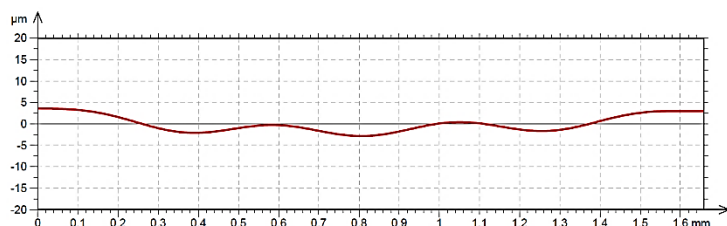


Parametry základního profilu.

Např.:
 P_a , P_p , P_v , P_z , P_t , ...

Obr. 80 Základní profil povrchu uprostřed zkušební vzorku ve směru osy X [103].

Profil vlnitosti (waviness profile) je profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c (Obr. 81). [102] Jeho parametry charakterizují odchylky od geometrického tvaru v přenosovém pásmu (λ_c - λ_f) viz obrázek (Obr. 83). [104]


**Parametry profilu vlnitosti/
parametry vlnitosti.**

Např.:

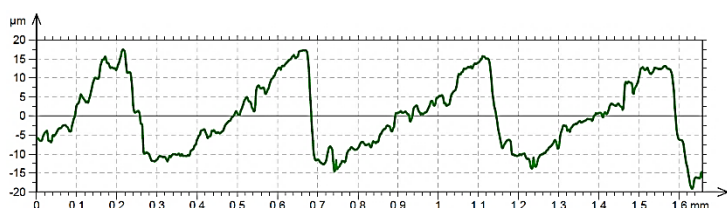
 $W_a, W_p, W_v, W_z, W_t, \dots$

Obr. 81 Profil vlnitosti uprostřed zkušební vzorku ve směru osy X [103].

Profil drsnosti (roughness profile) představují charakteristické hodnoty pro popis drsnosti povrchu (Obr. 82). Vyjadřují svislou vzdálenost mezi nejvyšší špičkou a nejhlubší rýhou v rámci filtrovaného profilu drsnosti, a to v definované měřicí délce označované jako l_n . [100; 101]

Profil drsnosti (R-profil) je získán z tzv. základního profilu potlačením dlouhovlnných složek pomocí filtru λ_c . Tento filtrovaný profil slouží jako základ pro hodnocení drsnosti a dlouhovlnných nerovností povrchu. [100; 101]

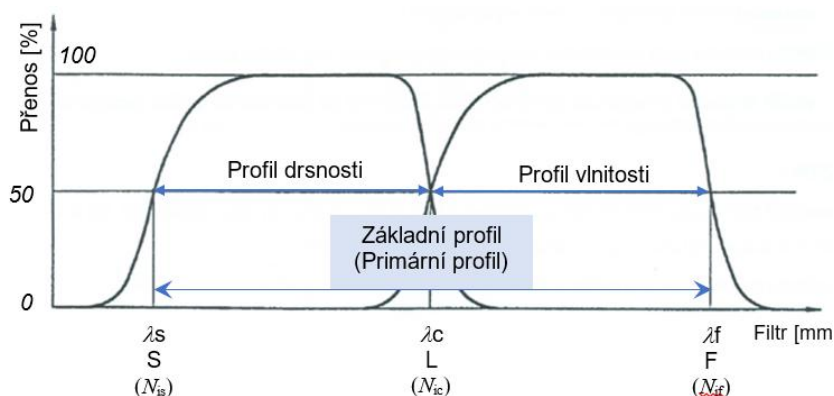
R-profil je definován v libovolné poloze x jako profil odvozený z primárního profilu odstraněním složek velkého měřítka prostřednictvím profilu typu L. Profil drsnosti tvoří základ pro vyhodnocení R-parametrů. Jeho parametry charakterizují odchylky od geometrického tvaru v přenosovém pásmu (λ_s - λ_c) viz obrázek (Obr. 83). [103]


**Parametry profilu drsnosti/
parametry drsnosti.**

Např.:

 $R_a, R_p, R_v, R_z, R_t, \dots$

Obr. 82 Profil drsnosti uprostřed zkušební vzorku ve směru osy X [103].



Obr. 83 Profilové parametry textury povrchu [103].

Popis zkoumaných parametrů drsnosti povrchu na zkušebním odlitku je uveden v následující tabulce (Tab. 34).

Tab. 34 Popis měřených parametrů dle normy ČSN EN ISO 21920. [101; 103]

Parametr drsnosti povrchu	Popis	Jednotka
R_p	střední výška výstupku profilu drsnosti	$[\mu\text{m}]$
R_v	střední hloubka prohlubně profilu drsnosti	$[\mu\text{m}]$
R_z	maximální výška profilu drsnosti	$[\mu\text{m}]$
R_a	střední aritmetická výška profilu drsnosti	$[\mu\text{m}]$

MĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI NA ZKUŠEBNÍCH ODLITCÍCH

Naměřené parametry drsnosti povrchu byly původně vyhodnoceny s L-filtrem $\lambda_c = 2,5$ mm a délkou hodnocení λ_c (9 mm). Nicméně tyto hodnoty nebyly správné, protože délka hodnocení neodpovídala doporučeným metrologickým pravidlům pro daný filtr. Následně bylo měření provedeno s L-filtrem 8 mm a délkou hodnocení λ_c (2 x 8 mm). To na vzorku o délce 16 mm umožnilo získat reprezentativní výsledky, protože byla dodržena požadovaná délka měření vůči použitému filtru a vzorek byl dostatečně dlouhý.

V následujících tabulkách (Tab. 35 a Tab. 36) jsou uvedeny naměřené hodnoty vybraných R-parametrů, které jsou porovnány s požadavky dříve platné normy ČSN EN ISO 4287, jež byla nahrazena novější normou ČSN EN ISO 21920. [101; 104]

Tab. 35 Srovnání parametrů drsnosti povrchu u žebra Z1 dle normy ISO 21920.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
R_p [μm]	88	119	135	331	142	53
R_v [μm]	120	81	77	145	116	49
R_z [μm]	208	200	211	476	258	101
R_a [μm]	27	27	35	70	33	15
Pořadí	2	2	3	3	3	1

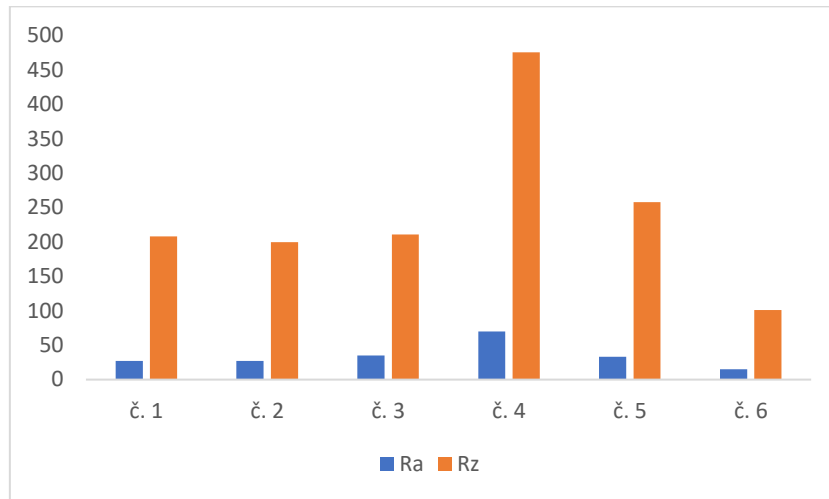
Tab. 36 Srovnání parametrů drsnosti povrchu u žebra Z1 dle už neplatné normy ISO 4287.

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6
R_p [μm]	89	119	135	331	149	54
R_v [μm]	120	82	77	149	116	49
R_z [μm]	209	200	212	480	265	104
R_a [μm]	27	27	35	70	33	15
Pořadí	2	2	3	3	3	1

V následujících tabulkách (Tab. 35 a Tab. 36) je uveden přehled několika klíčových R-parametrů (R_p, R_v, R_z a R_a), které jsou zásadní pro porovnání drsnosti s ostatními vzorky pro směsi č. 1–6. Výsledky naměřených R-parametrů drsnosti povrchu podle nové (Tab. 35) a staré normy (Tab. 36) lze považovat za velmi podobné, až na drobné odchylky.

Získané výsledky měření drsnosti korelují s výsledky měření rovinnosti i závěry vyplývající z této statistické analýzy. Směs č. 6, tj. s nátěrem, vykazuje nejnižší hodnoty R-parametrů ve srovnání s ostatními směsmi. Pokud jde o přítomnost aditiv, směs č. 1 a č. 2 mají srovnatelný povrch, až na drobné rozdíly v parametrech R_p a R_v. Popis měřených R-parametrů je zmíněn v tabulce (Tab. 34).

Na následujícím obrázku (Obr. 84) je zobrazen sloupcový graf, který porovnává R-parametry drsnosti, zejména R_a a R_z pro směsi č. 1–6.



Obr. 84 Porovnání parametrů drsnosti R_a a R_z pro jednotlivé směsi.

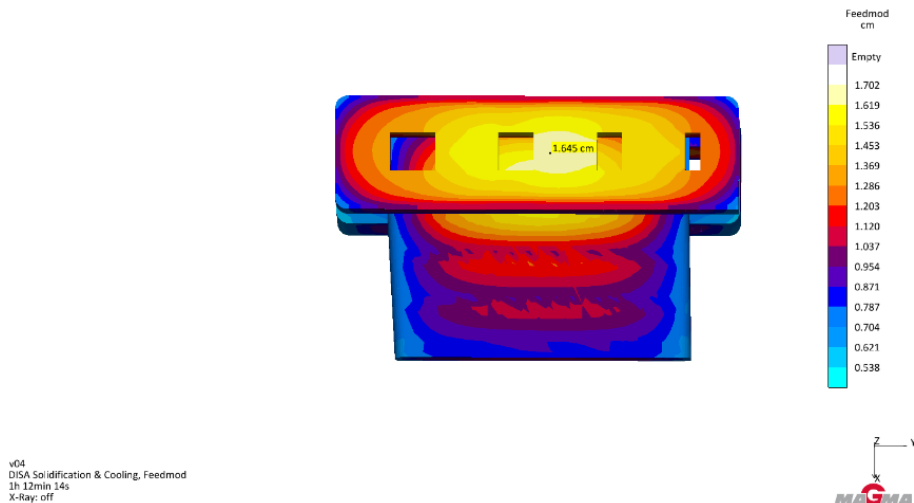
7.10 Závěr experimentu

3D skenování ukázalo, že správná volba přísady může mít významný vliv na kvalitu finálních odlitků. Touto metodou byly změřeny hodnoty rovinnosti na čtyřech žebrech a pomocí statistických nástrojů (analýza rozptylů, středních hodnot...) byly tyto hodnoty porovnány mezi sebou. Statistické analýzy rozptylu (ANOVA) ukázaly, že mezi směsmi č. 1, č. 2 a směsí s ochranným vodním nátěrem neexistují významné rozdíly, což naznačuje jejich podobný vliv na kvalitu rovinnosti. Naopak směsi č. 3 a č. 6 vykazovaly vyšší rozptyl, což je v souladu s výsledky Fisherova testu, který u těchto směsí indikoval odlišné chování.

Nejlepších výsledků z hlediska minimální penetrace bylo dosaženo s jádry opatřenými nátěrem. Statistické analýzy, včetně testů ANOVA a Tukeyho testu, potvrdily, že směs s vodním nátěrem vykazovala nejmenší variabilitu a nejnižší hodnoty penetrace. Uspokojivé výsledky poskytují také organická aditiva č. 1 a č. 2, které se ve statistických testech ukázaly jako stabilní s relativně nízkými hodnotami směrodatné odchylky.

Nicméně výsledky experimentální části mohou být částečně ovlivněny konstrukcí modelového zařízení. Jak je patrné z obrázku (Obr. 85), otvory se nacházejí v těsné blízkosti, což vede k jejich vzájemnému ovlivňování z hlediska teplotního pole a vede k delší době tuhnutí zkušebního odlitku. Tento efekt byl zřetelný zejména u žebra Z3, kde statistické testy ukázaly největší variabilitu, což naznačuje citlivost tohoto žebra na změny v konstrukci a umístění ventilačních otvorů.

Lze doporučit úpravu modelu, například snížením počtu žeber a jejich tloušťek, a to na 2 žebra umístěná v krajních polohách zkušebního odlitku.



Obr. 85 Simulace tepelného prohřátí formy.

Zároveň velké množství kovu obklopujícího jádro, které tvoří ventilační otvory zkušebního jádra, způsobuje výrazné přehřátí, zejména ve střední části odlitku. Tento jev byl potvrzen statistickým testováním rozptylů a středních hodnot, kdy žebro Z3 vykázalo větší rozptyl hodnot rovinnosti, což může být způsobeno právě tímto prohřátím. Na okrajích je tento efekt částečně zmírněn díky lepšímu odvodu tepla do formy, což vede k nerovnoměrnému tuhnutí zkušebního odlitku.

Navíc tepelná osa odlitku se vlivem výrazného přehřátí posouvá od jeho geometrické osy. Toto posunutí je nežádoucí, jelikož vede k nerovnoměrnému tuhnutí odlitku. Statistické analýzy potvrdily, že tento efekt může vést k větším odchylkám ve středních hodnotách rovinnosti, což bylo zřejmé zejména u žebra Z3. Kde výsledky vykázaly vyšší odchylky i hodnoty naměřené rovinnosti.

8 ZHODNOCENÍ PRODUKTIVITY VÝROBY JADER

Následující tabulka (Tab. 37) poskytuje přehled času potřebného k samotné výrobě jádra v podmínkách slévárny MAT a následné srovnání různých způsobů manipulace. Nejprve je uveden čas při ručním namáčení pouze poloviny jádra brzdového kotouče, poté při namáčení ve vaně a nakonec ve srovnání s výrobou jader s aditivu.

Tab. 37 Přehled doby potřebné k výrobě jádra na Laempe 2 a jeho následné manipulaci, včetně aplikace nátěru a bez něj.

	Výroba jader s nátěrem		Výroba jader s aditivu
	namáčením poloviny jádra	namáčením v namáčecí vaně	bez nátěru
Výroba jader [s]	38–49	38–49	50
Manipulace jader operátorem [s]	23	25	
Údržba [s]	10	10	10
Celkový čas [s]	71–82	73–84	~60

Z předchozí tabulky (Tab. 37) je patrné, že finální čas výroby jádra při namáčení pouze poloviny a při namáčení celého jádra v namáčecí vaně je téměř stejný. Naopak výroba jader z jádrové směsi s aditivu je přibližně o čtvrtinu rychlejší.

Výhodou jader s aditivu je, že jsou ihned použitelná pro odlévání, zatímco jádra opatřená nátěrem musí schnout po dobu 24 hodin. Nátěr však poskytuje výhodu v tom, že dokáže zakrýt drobné nepřesnosti jádra, což vede k hladšímu povrchu. U jader s aditivu je naopak nezbytné, aby nevykazovala žádné viditelné poškození, jelikož by se tyto vady projevíly na jakosti finálního odlitku.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala problematikou penetrace taveniny do formovacích a jádrových směsí u odlitků z litiny s lupínkovým grafitem při odlévání tzv. na syrovo do bentonitových forem. Experimentální část proběhla ve slévárně MAT Ueckermünde a zahrnovala testování pěti různých aditiv (dvou organických a tří anorganických). Pro uvedení a dobré pochopení nátěrů byla sepsána kapitola, která sice není hlavním tématem této diplomové práce, ale poskytuje užitečné informace k jejich porozumění.

Pro predikci penetrace byl stanoven penetrační index, který naznačuje pravděpodobnost výskytu mechanické penetrace u odlitku. Výsledky hodnocení rovinnosti tuto domněnku potvrdily a k penetraci skutečně docházelo. To zejména uprostřed odlitku, konkrétně v oblasti žeber Z2 a Z3.

Z výsledků nevyplývá, že by hloubka penetrace byla ovlivněna výhradně tloušťkou stěny. Ačkoliv směsi vykazovaly podobné rozptyly hodnot rovinnosti, samotné střední hodnoty se mezi směsmi lišily. Nejlepší výsledky byly jednoznačně dosaženy při použití nátěru, což odpovídá i dosavadním zkušenostem ve slévárně MAT. Nicméně vzhledem k finančním nákladům na aplikaci nátěru je snaha hledat alternativní řešení.

Z testovaných směsí se jako nejúčinnější ukázala směs č. 1, případně směs č. 2. U těchto dvou směsí je vhodné pokračovat v dalším testování a zvážit jejich případné zavedení do sériové výroby. Použití aditiv prokazatelně vede ke zkrácení cyklu výroby a zvýšení produktivity, což může mít pozitivní dopad na celkové výrobní náklady. Pro komplexní ekonomické vyhodnocení by však bylo nutné započítat také náklady na neshodnou výrobu, což v tomto experimentu zahrnuto nebylo. Proto nelze jednoznačně určit ekonomický přínos jednotlivých směsí.

Vhodné by bylo rozšířit experiment o větší počet vzorků a zároveň se doporučuje zvážit i úpravu lící teploty. Například snížení teploty o 100 °C by teoreticky vedlo ke zvýšení penetračního indexu nad hodnotu 1, čímž by se mohl výskyt penetrace zcela eliminovat. Nicméně takové snížení je u litiny v praxi velmi obtížně proveditelné. Je však možné, že nižší lící teplota by mohla pozitivně ovlivnit chování směsí, které byly za současných podmínek vyhodnoceny jako méně vhodné. To, že tyto směsi byly méně účinné mohlo být ovlivněno právě výší lící teploty.

Výsledky i řešení tohoto experimentu mohou sloužit jako vzor pro další testování s použitím odlišných typů aditiv, nebo opakováním zkoušek se stejnými směsmi, ale za změněných provozních podmínek. Vhodné by bylo zaměřit se například na různé lící teploty, odlišné geometrie odlitků. Takové rozšíření by mohlo pomoci lépe pochopit vliv jednotlivých faktorů na výslednou kvalitu odlitků a optimalizovat celý proces s ohledem na výrobní produktivitu a ekonomické náklady.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ALLIED MARKET RESEARCH. *Automotive Brake System Market Size...* Online. C2024. Dostupné z: <https://www.alliedmarketresearch.com/automotive-brake-system-market-A06012>. [cit. 2024-09-16].
2. MORDOR INTELLIGENCE [MI]. *Automotive Brake System Market Size & Share Analysis...* Online. C2024. Dostupné z: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-brake-system-market>. [cit. 2024-09-16].
3. [MMR]. *Automotive Disc Brake Market-Global Industry Analysis...* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-automotive-disc-brake-market/54771/>. [cit. 2024-09-16].
4. BRŮŽA, František. *Vliv velikosti ostríva jádrových směsí na povrchovou jakost litinových odlitků*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2022.
5. MAT FOUNDRY GROUP LTD. *A leader in casting and machining technology*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.matfoundrygroup.com/>. [cit. 2024-09-14].
6. ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: Studijní opora*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013.
7. MAGMA. *Committed to casting excellence*. Online. Dostupné z: <https://www.magma-soft.de/cs/reseni/litina/>. [cit. 2024-09-21].
8. RAŠEK, Ondřej. *Povrchové vady odlitků*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Ladislav Tomek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie., 2013.
9. TOMEK, Ladislav; STACHOVEC, Ivo a TOMKOVÁ, Jana. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků: Studijní syllabus*.
10. KOMÁREK, Michal. *Prezentace vad odlitků k podpoře výuky*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Petr Zikmund. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav strojírenské technologie., 2015.
11. ELBEL, Tomáš a kol. *Vady odlitků ze slitin železa*. Brno: Matecs, 1992.
12. ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA. ČSN 42 1240, *Vady odlitků, názvosloví a třídění vad*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1964.
13. STRÁNSKÝ, Karel; KOPLÍK, Radovan a RUSÍN, Karel. *Vady odlitků - jejich klasifikace, příčiny a prevence*. *Slévárství*. 1997, roč. 45, č. 4, s. 133-135.
14. JELÍNEK, Petr a RUSÍN, Karel. *Vady povrchu odlitků*. *Slévárství*. 1997, roč. 45, č. 5, s. 185-195.
15. PTÁČEK, Tomáš. *Penetrace kovu do bentonitových formovacích směsí při odlévání litinových odlitků*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2018.

16. FALADA, Tomáš. *Tvorba podpůrného programu pro numerické výpočty vtokových soustav odlitků litých pod tlakem*. Diplomová práce. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích., 2023.
17. FOUNDRY LEXICON. *Rough surface*. Online. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/rough-surface-4071/?cHash=5626ec099b36e43588cb89c8d6810132>. [cit. 2024-09-22].
18. ACCRETECH EUROPE. *Měření struktury povrchu*. Online. C2019. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>. [cit. 2024-09-24].
19. PLEŠINGER, Adolf M. *Vady odlitků ze šedé litiny*. 4. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952.
20. FOUNDRY LEXICON. *Burnt-on sand*. Online. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/burnt-on-sand-3621/?cHash=550f91f0b372f5c0fa7505ada5fd8791>. [cit. 2024-09-25].
21. JAKUBEC, Petr. *Vady ocelových odlitků*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vítězslav Pernica. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2015.
22. *Atlas of defects in castings*. 2nd revised edition. London: The institute of British foundrymen, 1961.
23. TOMEK, Ladislav a KOSOUR, Vojtěch. *Predikce vzniku vad typu připečenin a hlubokých zapečenin: Studijní opora*.
24. BURIAN, Alois a KŘÍSTEK, Jiří. Vliv par kovů a cristobalitické expanze na vznik hlubokých zapečenin u ocelových odlitků. *Slévárství*. 1998, roč. 36, č. 10, s. 412-421.
25. FOUNDRY LEXICON. *Burnt-on*. Online. Dostupné z: https://www.giessereilexikon.com/uploads/tx_d3ency/4050-03.png. [cit. 2024-09-26].
26. JELÍNEK, P. a PAWLAS, P. Vliv par kovů a cristobalitické expanze na vznik hlubokých zapečenin u ocelových odlitků. 1988, roč. 36, č. 10, s. 412-421.
27. TOMEK, Ladislav. *Interakce tekutého kovu s formovací směsí vypracoval*. Diplomová práce, vedoucí Ing. Karel Rusín, DrSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2008.
28. MIKŠOVSKÝ, F.; HAVLÍČEK, F. a BARTUŠKA, M. Vznik fází na rozhraní forma-kov. *Slévárství*. 1973, roč. 21, č. 10, s. 393-396.
29. HOLTZER, Mariusz; DAŃKO, Rafał a GÓRNY, Marcin. *Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings: The Effects of Mold Sand/Metal Interface Phenomena*. Springer Briefs in Materials, 2015. ISBN 978-3-319-14582-2.
30. NEUDERT, Alois. Penetrace - připečeniny u odlitků ze slitin železa. *Slévárství*. 2011, roč. 59, č. 11, s. 364-368.
31. ZÁDĚRA, Antonín. *Teoretické základy oboru - přednáška č. 2: Povrchové napětí kapalin*. 2023.

32. STEFANESCU, D.M.; GIESE, S.R.; PIWONKA, T.S. a LANE, A. Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I: Physics of Penetration Defects and Penetration Model. 1996.
33. STACHOVEC, Ivo. *Vliv cementových forem na strukturu odlitků z litiny LKG*. Diplomová práce, vedoucí prof. Ing. Karel Rusín, DrSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009.
34. STEFANESCU, Doru M; BARLOW, J.O; HAYES, K.D a OWENS, M. *Penetration of Liquid Steel in Sand Molds Part I: Physics and Chemistry of Penetration and Mathematical Modeling – Metal Side*. 109. Transactions of the American Foundry Society, 2001.
35. GIESSEREI PRAXIS. *Penetration*. Online. Dostupné z: <https://giesserei-praxis.de/giesserei-lexikon/penetration/>. [cit. 2024-10-03].
36. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
37. LANE, A.M; OWENS, M.D; DORU M. STEFANESCU, Doru M a PIWONKA, T.S. Penetration Of Liquid Steel In Sand Molds, Part II: Chemical Reactions At The Mold/Metal Interface During Casting Of Steel. *Transactions American Foundry Soc.* 2001, č. vol.109, s. 1327-1345.
38. NEUDERT, Alois. Penetrace: Přípečeniny u odlitků ze slitin železa. *Slévárenství*. 2011, roč. 59, č. 11-12, s. 364-368.
39. ELBEL, T. a JELÍNEK, P. Příčiny a důsledky cristobalitické expanze směsí s vodním sklem. *Slévárenství*. 1973, roč. 21, č. 9, s. 353-360.
40. *Krystalická stavba látek (kovů): Základy krystalografie*.
41. NEUDERT, A a DUDA, J. *Penetrace kovu do forem ze syrových bentonitových směsí: Vady odlitků IV.-Výběr přednášek ze semináře*. Česká slévárenská společnost pobočka Kopřivnice, 2000.
42. TRINOWSKI, D.M.; LADEGOURDIE, G. a LOCHTE, K. *New Coldbox Binder System for Improved Productivity*. (vol. 7). 1999.
43. ŠINDLEROVÁ, Eliška. *Změna nákladů a ekologie výroby chemicky vázaných jádrových směsí při výrobě odlitků z litiny s kuličkovým grafitem*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2022.
44. HLAVSA, Petr. *Interakce jádro - tavenina při odlévání hlav válců z Al slitin*. Diplomová práce, vedoucí prof. Ing. Karel Rusín, DrSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie., 2016.
45. ŠINDLEROVÁ, Eliška. *Slévárenské formovací směsi s biopolymerními pojivy*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2020.
46. GRÖNING, Peter; SCHABRUCKER, Markus a IVANOV, Stefan. Retrospektiva a budoucnost coldboxových systémů z pohledu HA. Online. *Slévárenství*. 2019, roč. 67, č. 9-10, s. 348-349. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/4glQFmXPZI6s9dUb>. [cit. 2024-10-10].
47. GRÖNING, Peter-michael. Moderní přísady pro metodu studeného jaderníku (cold box). Online. *Slévárenství*. 2019, roč. 67, č. 3-4, s. 112-117. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/4Vm6Wgrc2p0t0e6B>. [cit. 2024-10-10].

48. TEGEL, Michal. *Organické pojivové systémy: Samovolně tvrdnoucí organické pojivové systémy (ST směsi)*. Prezentace z předmětu Formovací materiály a ekologie. 2023.
49. *Netrvalé formy: I. Generace (jílová pojiva)*.
50. IRZ. *Benzen*. Online. Dostupné z: <https://www.irz.cz/latky-v-irz/benzen>. [cit. 2024-10-21].
51. BUSBY, Andrew. *Cold-Box Process Training*. 2011.
52. JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava: Vlastní náklad, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
53. Technologie Cold box a nabídka firmy Formservis. *Slévárství*. 1998, roč. 46, č. 9-10, s. 338-341.
54. HA GROUP. *Výrobky Cold-Box*. Online. Dostupné z: <https://www.ha-group.com/cz/vyrobky-a-sluzby/vyrobky/cold-box/>. [cit. 2024-10-12].
55. ASK CHEMICALS. *Cold Box: Product Line Overview*.
56. SVIDRÓ, József Tamás; SVIDRÓ, Judit; DIOSZEGI, Attila a FERENCZI, Tibor. *The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/319251737> The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process. [cit. 2024-10-12].
57. FORM SERVIS. *Zařízení pro vytvrzování směsí*. Online. C2024. Dostupné z: <http://www.formservis.cz/cz/o-firme/produkty/strojni-zarizeni/zarizeni-pro-vytvrzovani-smesi/>. [cit. 2024-10-13].
58. DRATNAL, Lukáš. *Vodou rozpustná slévárenská pojiva vytvrzovaná teplem*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Petr Cupák, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2014.
59. FOUNDRY LEXICON. *Cold box process*. Online. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/cold-box-process-4393/?cHash=21e68b6dc7f49ab340f1da2d4e91d548>. [cit. 2024-10-12].
60. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3 doplněné vydání. Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
61. *Primafond*. Online. Dostupné z: <https://www.primafond.com/blog/cold-box-process/>. [cit. 2024-10-16].
62. BEELEY, Peter. *Foundry technology: Production Techniques 3 Further casting techniques*. 2. Butterworth Heinemann, 2001.
63. PATÁK, Daniel. *MAT Foundries Europe GmbH in Ueckermünde Report*. 2023.
64. STANCLIFFE, M. *Phenolic Urethane Cold-box Binders: A study of global properties, variables and causes and effects*. Dostupné také z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.iftabira.org/pdfs/118%20M.Stancliffe_460359612.pdf.

65. GRÖNING, Peter a PACAL, Lubor. HA – pokročilé cold box systémy pro lití neželezných kovů a jejich environmentální aspekty. Online. *Slévárství*. 2016, roč. 64, č. 9-10, s. 373-380. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/IFkMzI9aBr8Ftzu2>. [cit. 2024-10-13].
66. RUSÍN, Karel; MACÁŠEK, Igor; AVDOKUŠIN, Vladimír a DOROŠENKO, Štěpan. *Slévárenské formovací materiály*. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-03-00278-8.
67. WÖHR CZ S.R.O. *Průběžný vířivý mísič*. Online. Dostupné z: <https://www.aagm.de/cs/prubezny-virivy-misic.html>. [cit. 2024-10-14].
68. *Core sand mixer, Automation grade: Semi-Automatic*. Online. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/core-sand-mixer-7655395573.html?mTd=1>. [cit. 2024-10-14].
69. DLOUHÁ, Monika. *Srovnání ekologických a technologických vlastností různých způsobů výroby slévárenských forem a jader*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Petr Cupák, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2012.
70. DELIMANOVÁ, Petra a VASKOVÁ, Iveta. *Comparison and evaluation of the cast iron castings surface using different types of foundries sands: Results in materials*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590048X24000918?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d1fd1b57bd42794. [cit. 2024-10-13].
71. PIZZI, A. a IBEH, C.C. *Handbook of Thermoset Plastics: Phenol-formaldehyde resins*. 4. William Andrew, 2022. ISBN 9780128216323.
72. FOUNDRY LEXICON. *Veining*. Online. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/veining-3663/?cHash=4182d478304b2c22d6c7d9ddaa09028c>. [cit. 2024-10-21].
73. SLOVÁK, Stanislav a RUSÍN, Karel. *Teorie slévání*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
74. NĚMEC, Milan; BEDNÁŘ, Bohumír a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
75. RUSÍN, Karel. *Disperzní formovací materiály*. 2., nezměněné. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1985.
76. JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi-III. část: Pochody na rozhraní formákov a ve slévárenské formě*. Ostrava, 1984.
77. TOMKOVÁ, Jana. *Postupy pro dosažení vyšší povrchové jakosti ocelových odlitku*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2010.
78. NWAOGU, Ugo a TIEDJE, Niels Skat. *Foundry Coating Technology: A Review*. Online. Materials Science and Applications, 2011. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268328237_Foundry_Coating_Technology_A_Review. [cit. 2024-10-23].

79. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. *Molding methods and materials*. United States of America: Des plaines, Illinois, 1962.
80. FIALA, Pavel. *Vliv nátěru na jakost ocelových odlitků odlévaných do furan-chromitových směsí*. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Vlasta Bednářová, CSc. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Katedra slévárenství, 2011.
81. *Nátěrové hmoty na pískové formy a jádra*. Slévárenská ročenka. Brno: ČV slévárenské společnosti ČSVTS, 1987.
82. BEDNÁŘOVÁ, V.; GRMOLENSKÁ, P. a HRUŠKOVÁ, J. Ověřování parametrů slévárenských forem ovlivňujících penetraci při výrobě masivních ocelových odlitků. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské -Technické univerzity Ostrava*. 2009, roč. LII, č. 2.
83. BAKER, S.G. Evaluating Refractory Coatings: a Practical Approach: Modern Casting. 2002, č. 92, s. 21-23.
84. BURYAN, Petr; MITERA, Jiří; HÁJEK, Jiří; SOCHOR, Miroslav a IVANOVIČ, Milorad. *Pojivo pro ochranné slévárenské žáruvzdorné nátěry a postřiky*. Slovenská Republika, 1987.
85. SIDDY, P. *The changing face of refractory coatings in India*. 68. Indie: SSK Chennai, 2008.
86. ASK CHEMICALS. *Coating*. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.ask-chemicals.com/foundry/coatings>. [cit. 2024-11-01].
87. *Penetration block: Kick of meeting*.
88. H-GLOST. *Foundry sands*.
89. OSTRÉŽÍ, Filip. *Ostrřiva slévárenských formovacích a jádrových směsí*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Petr Cupák, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, 2017.
90. ASK CHEMICALS. *VEINO 028 FW 1: SICHERHEITSDATENBLATT gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006*.
91. HA GROUP. *Feranex I-1222: PRODUKTINFORMATION COLD-BOX PROZESS*.
92. HA GROUP. *Feranex 7523: PRODUKTINFORMATION COLD-BOX PROZESS*.
93. HA GROUP. *Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31: Feranex I-1222*.
94. HA GROUP. *Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31: Feranex 7523*.
95. ASK CHEMICALS. *Katalog výrobků pro slévárny: Pro výrobu odlitků z litiny, oceli a z neželezných kovů*.
96. *Příprava slévárenské technologie a vady litinových odlitků: Seminář*. 2025.
97. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin: Učební texty vysokých škol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojní, 1998. ISBN 80-214-1263-1.

98. KAREŠOVÁ, Pavla. *Technologie suchého elektrolytického leštění slitiny Ti-6Al-4V*. Bakalářská práce, vedoucí prof. Ing. Miroslav Piška, CSc. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie., 2023.
99. ČSN EN ISO 21920-1, *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 1: Indikace struktury povrchu: (En) Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture*). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
100. ČSN EN ISO 21920-2, *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu: (En) Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
101. ČSN EN ISO 16610-31, *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Filtrace - Část 31: Robustní profilové filtry - Gaussovy regresní filtry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
102. JANKOVÝCH, Róbert a POLZER, Aleš. *Textura povrchu profilové a plošné parametry: Srovnání parametrů textury dle ISO 4287, ISO řady 13565 a ISO 21920-2 (Plošné parametry dle ISO řady 25178)*. Brno, 2024.
103. ČSN EN ISO 4287, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

označení	Legenda	jednotka
\mathcal{A}	afinita	[J. mol ⁻¹]
A	plocha	[cm ²]
a	délka strany	[mm]
A _c	plocha ochlazovaného povrchu odlitku	[cm ²]
b	úsek, který se nachází na ose tloušťky natuhlé vrstvy ξ	[mm]
b _f	určuje koeficient tepelné akumulace	[J. m ⁻² . K ⁻¹ . s ^{-1/2}]
C	součinitel odporu vtoku (0,6–0,9)	[–]
C _E	uhlíkový ekvivalent	[–]
d _p	průměr pórů mezery mezi pískovými zrny	[mm]
F _{left} , F _{right}	parametr ovlivňující průtok tekutého kovu skrz vtokový systém	[kg]
F _r	Froudeho číslo	[–]
g	gravitační konstanta	[m. s ²]
ΔG	Gibbsova energie	[J. mol ⁻¹]
G _W	surová hmotnost odlitku	[kg]
h	metalostatická výška	[m]
H	charakteristická délka vtokového systému	[m]
ΔH	reakční teplo	[J. mol ⁻¹]
k	konstanta tuhnutí	[m * s ^{-1/2}]
K _M	konstanta modulu	[–]
M _c	modul odlitku	[cm]
M _F	modul nálitku	[cm]
P _{dyn}	dynamický tlak	[Pa]
P _{exp}	expanzní tlak	[Pa]
P _{rate}	rychlost lití	[kg*s ⁻¹]
P _{st}	metalostatický tlak	[Pa]
P _{time}	doba lití ($P_{time} = \frac{G_W}{P_{rate}}$)	[s]
P _γ	kapilární tlak	[Pa]
P _f	tlak od plynů formy	[Pa]
P _{gas}	ztráta tlaku vlivem tření mezi kovem a formou	[Pa]
R _a	střední aritmetická odchylka	[–]
R _j	relativní tloušťka jádra	[–]
ΔS	změna entropie	[J. mol ⁻¹]
S _{qrt}	odmocnina pro výpočet rychlosti vtoku ($v = \sqrt{2 * G * H}$)	[m*s ⁻¹]
t	licí teplota	[°C]
T	Teplota	[K]
T _{krit.}	kritický čas	[s]
S ₁	povrch odlitku, zejména odvod tepla při ochlazování	[m ²]
S _E	stupeň eutektičnosti	[–]
U _W	čistá hmotnost odlitku	[kg]
V	vstupní rychlost kovu do formy	[m*s ⁻¹]
V ₁	objem odlitku, zejména jeho tepelný obsah	[m*s ⁻¹]
V _c	objem odlitku	[cm ³]
V _F	objem nálitku	[cm ³]

označení	Legenda	jednotka
X%	zastoupení jednotlivých prvků	[hm. %]
γ_{LG}	napětí mezi taveninou a plynem	[-]
γ_{GS}	napětí mezi formou a plynem	[-]
γ_{LS}	napětí mezi taveninou a formou	[-]
θ	úhel smáčení	[°]
θ_A	skutečný úhel smáčení	[°]
θ_{kr}	kritický úhel smáčení	[°]
ρ	hustota slitiny	[kg*m ⁻³]
ξ	úsek na ose y, který odpovídá tloušťce natuhlé vrstvy	[mm]
τ	doba tuhnutí	[s]
ψ	objemové změny, které záleží na tepelném namáhání jader	[-]

Zkratky

označení	Legenda
Ba	Barium
BTEX	limitní hodnota pro směs látek benzenu, toluenu, etylbenzenu a xylenu
C	Uhlík
Ca	Vápník
CB	metoda cold-box studeného jaderníku
DISA	automatická formovací linka Disamatic
DMEA	Dimetyletylamin
DMIPA	dimetylisopropylamin
DMPA	dimetylpropylamin
EACB	Epoxy-Acrylate Cold-Box neboli ISOSET
ECPCB	Ester-Phenolic Cold-Box neboli Beta-set/Novaset
Fe	Železo
JBS	jednotná bentonitová směs
K	Draslík
Li	Lithium
LKG	litina s kuličkovým grafitem
LLG	litina s lupínkovým grafitem
Mn	Mangan
Na	Sodík
O	Kyslík
P	Fosfor
PI	penetrační index
PUCB	Phenolic-Urethane cold-box
S	Síra
Si	Křemík
TEA	Trietylamin
TOC	celkový organický uhlík
UACB	Urethane-Acrylate Cold-Box
VOC	těkavé organické látky