



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav strojírenské technologie**

# **Racionalizace technologie výroby přesného odlitku**

**(Casting racionalization made by Investment casting technology)**

**Diplomová práce**

Autor:

Bc. Ondřej Vrátný

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Studijní obor:

Výrobní a materiálové inženýrství

---

**Praha 2016**

Zadání DP

**Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci „Racionalizace technologie výroby přesného odlitku“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím podkladů a informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 11. července 2016

.....

Bc. Ondřej Vrátný

**Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce Ing. Alešovi Hermanovi, Ph.D. za poskytnutí nových a cenných informací, nejenom v rámci mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení a zaměstnancům Prague Casting Services a.s. za příležitost realizovat tuto diplomovou práci a za pomoc v průběhu vypracování práce, jmenovitě bych chtěl poděkovat zejména panu Jiřímu Kočovskému a Ing. Petru Kozielovi.

**Anotace**

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Téma bakalářské práce:	Racionalizace technologie výroby přesného odlitku
Akademický rok:	2015/2016
Autor:	Bc. Ondřej Vrátný
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Herman, Ph.D.

**Abstrakt:**

Hlavním důvodem vypracování této diplomové práce je navrhnout opatření v technologii přesného lití vytavitelným modelem vybraného odlitku pro energetický průmysl s ohledem na potlačení vad. Všechny požadavky zákazníka jsou splněny. Problémem je snížená kvalita odlitků spjatá s vysokými náklady na opravy povrchu odlitků. Předpokladem je zvýšená koncentrace vměstků, především oxidických blan. V práci jsou uvedeny některé metody ochrany taveniny s použitím inertního plynu.

**Klíčová slova:** Metoda přesného lití, vady odlitků, metalografie, analýza vměstků

**Rozsah práce:**

Počet stran	111
Počet obrázků	74
Počet tabulek	35
Počet grafů	19

**Annotation**

University:	Czech Technical University in Prague , Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Theme of work:	Casting racionalization made by Investment casting technology
Academic year:	2015/2016
Autor:	Bc. Ondřej Vrátný
Supervisor:	Ing. Aleš Herman, Ph.D.

**Abstract:**

The main reason of analysing certain castings produced by Investment casting is to increase their quality. This type of castings is used in energy industry. All requirements from customer are fulfilled. The problem is in spending a lot of money for repairing the low-quality surface. The reason seems to be in inclusions, mostly oxidic type. There are not a lot of studies focused on this problem. The way where to go is probably working with inert gases.

**Key words:** Investment casting, casting defects, metallographic, inclusion analysis

**Volume of work:**

Number of pages	111
Number of pictures	74
Number of tables	35
Number of graphs	19

# Obsah

1	Úvod .....	10
1.1	Cíl práce.....	11
2	Technologie přesného lití a klasifikace vad v této technologii.....	12
2.1	Proces přesného lití ve slévárně Prague Casting services.....	12
2.2	Žárovzdorné materiály pro pecní vyzdívky .....	21
2.2.1	Porovnání výdusek Coral SXL a Dri-vibe 883 .....	23
2.3	Interakce mezi taveninou a formou.....	26
2.3.1	Primární břečka .....	28
2.4	Teplota materiálu.....	28
2.5	Metoda LBI (Laminar Barrier Inerting for Induction Melting).....	29
2.5.1	Princip fungování LBI.....	29
2.5.2	Experiment .....	31
2.5.3	Výsledky .....	32
2.6	Metoda ochrany taveniny s použitím tekutého argonu .....	37
2.6.1	Experiment .....	38
2.6.2	Výsledky .....	38
2.6.3	Závěr.....	39
2.7	Klasifikace vad přesných odlitků .....	40
2.7.1	Nezaběhnutí (číslo skupiny vad: 1).....	41
2.7.2	Vyboulení (číslo skupiny vad: 1) .....	41
2.7.3	Přípečeniny (číslo skupiny vad: 2) .....	42
2.7.4	Zavaleniny (číslo skupiny vad: 2).....	42
2.7.5	Zálupy (číslo skupiny vad: 2).....	43
2.7.6	Nárůstky - strupy (číslo skupiny vad: 2) .....	43
2.7.7	Výronky (číslo skupiny vad: 2).....	44
2.7.8	Trhliny (číslo skupiny vad: 3) .....	45
2.7.9	Praskliny (číslo skupiny vad: 3).....	45
2.7.10	Bodliny (číslo skupiny vad: 4) .....	46
2.7.11	Staženiny (číslo skupiny vad: 4).....	46
2.7.12	Struskovitost (číslo skupiny vad: 5) .....	47
2.7.13	Zadrogeniny (číslo skupiny vad: 5).....	48

2.7.14	Broky (číslo skupiny vad: 5).....	49
2.7.15	Často se vyskytující vady u přesných odlitků, jež nejsou součástí ČSN 42 1240.....	49
2.7.16	Vměstky.....	50
3	Kovové materiály pro speciální aplikace .....	53
3.1	Žáropevné materiály .....	53
3.1.1	Feriticko-perlitické a bainitické oceli.....	53
3.1.2	Vysokopopuštěné martenzitické oceli .....	55
3.1.3	Austenitické oceli .....	55
3.1.4	Slitiny Niklu a Kobaltu .....	56
3.1.5	Vysokotavitelné kovy a jejich slitiny.....	57
3.2	Vybrané materiály odlévané v Prague Casting Services a.s. ....	57
3.2.1	CF3 (AISI 304L).....	57
3.2.2	N155 .....	59
3.2.3	IN-738LC.....	61
4	Analýza a vyhodnocení technologičnosti konstrukce zadaného odlitku a stávající výrobní technologie .....	65
4.1	Postup tavení a lití.....	68
5	Návrh racionalizace výrobní technologie s ohledem na potlačení vad odlitků.....	74
5.1	Pecní vyzdívka .....	74
5.2	Analýzy vybraných odlitků .....	76
5.2.1	Chemická analýza vměstků z materiálu CF3 .....	77
5.2.2	Porovnání s analýzou podobných druhů vměstků u materiálu N155 .....	82
5.2.3	Analýza obsahu kyslíku vybraných odlitků.....	85
5.2.4	Závěr analýz obsahů kyslíku a dusíku ve vzorcích.....	88
5.3	Probublávání taveniny argonem .....	89
5.3.1	Vyhodnocování.....	91
5.3.2	Subjektivní varianta vyhodnocení .....	91
5.3.3	Objektivní varianta hodnocená dle počtu bodových závarů.....	92
5.3.4	Závěr.....	92
5.4	Návrhy na změnu technologie .....	96
6	Závěr.....	98
7	Seznam použitých zdrojů.....	103
8	Interní specifikace a předpisy.....	108



---

9	Přílohy.....	109
---	--------------	-----

# 1 Úvod

Cílem této diplomové práce je analyzovat problém snížené kvality zadaného odlitku a navrhnout racionalizaci technologie výroby s ohledem na potlačení vad odlitků. Hlavním důvodem jsou poměrně vysoké náklady spojené s opravou vadných odlitků. Největší podíl oprav představují povrchové vady, které se musejí vybrousit, zavařit a opět zabrousit. Tyto náklady tvoří nejen opotřebování nástrojů na cídírně, spotřeba přídavného materiálu na svařovně, náklady na energii apod., ale také spotřeba času na jednotlivých úsecích kontroly a výroby. Jedná se o odlitek určený pro energetický průmysl vyráběný metodou přesného lití vytavitelným modelem ve slévárně Prague Casting Services a.s.

V teoretické části diplomové práce se budu nejprve zabývat technologií přesného lití s popisem procesu výroby odlitku metodou vytavitelného modelu ve slévárně Prague Casting Services a.s. a přehledem vad, které se v této technologii nejčastěji vyskytují. Souhrn vad nebude jen výpisem z normy, ale zároveň s popisem vady zmíním příčiny vzniku a možnosti odstranění. V rámci technologie přesného lití bude uvedena celá teoretická část, která bude souviset s následující praktickou částí. Kostra praktické části se tedy bude odkazovat na část teoretickou, především pak v kapitole páté s názvem *Návrh racionalizace výrobní technologie s ohledem na potlačení vad*.

Další kapitolou teoretického celku bude přehled kovových materiálů pro speciální aplikace. Tato velice obecná kapitola, která pokud by se zpracovávala podrobně, by neměla konce, se bude věnovat především základním materiálům, které popisují dále ve své práci, a přehled některých ocelí, slitin kobaltu a niklu, převážně pro energetický průmysl. Bude se jednat pouze o rozdělení základních druhů materiálu pro tyto aplikace a přiblížení některých vybraných materiálů z hlediska jejich pevnostních nebo technologických charakteristik.

Praktická část bude postupně popisovat jednotlivé přístupy v rámci analýzy celého problému snížené kvality odlitků. V první řadě se pokusím schematicky znázornit podobu odlitku, jelikož si firma nepřeje z důvodu svého „know-how“ zveřejňovat konkrétní fotografie, či výkresy odlitku. V kapitole *Analýza a vyhodnocení technologičnosti konstrukce zadaného odlitku a stávající výrobní technologie* tedy přiblížím obecně tvar a velikost odlitku, jeho přibližnou hmotnost a popíši způsob plnění formy. Přesto, že se této kapitole nebudu věnovat do podrobností, tyto informace jsou nezbytné k pochopení všech souvislostí analyzovaného

problému. Zároveň zde nastíním postup tavení a odlévání ve výchozím stavu, než se začala práce řešit.

Vyvrcholením bude pátá kapitola s názvem *Návrh racionalizace výrobní technologie s ohledem na potlačení vad*, kde shrnu postup své práce v rámci řešení problému s dílčími výsledky a závěry. Prvním krokem bude hledání výrazné závislosti výměny pecní výdusky a lící pánve na kvalitě odlitků. Ke kvantifikaci kvality použiji souhrn dat ze svařovny, kde se zaznamenává mapa a počet bodových závarů na odlitku. Součástí budou analýzy vybraných vměstků pro řešený materiál CF3 (chemické složení odpovídá korozivzdorné nízkouhlíkaté oceli AISI 304L) v porovnání s obdobnými analýzami provedenými pro jiné odlitky z materiálu s označením N155. Zároveň budu analyzovat obsahy prvků, které se běžně nezjišťují, a to kyslíku a dusíku. Mimo analýzy se v této kapitole budu věnovat také popisu a vyhodnocení technologie probublávání taveniny argonem, kterou jsme zavedly v létě roku 2015. Tato technologie by měla zajistit vyplouvání vměstků, ať už jakéhokoliv charakteru, na povrch do strusky, kde by se měla tavenina od strusky vyčistit. Na základě případného zlepšení kvality odlitků by se odvíjel další postup.

Závěrem shrnu dosažené výsledky a vyslovím na jejich základě svůj názor, jakým způsobem bych problém snížené kvality odlitků řešil.

## 1.1 Cíl práce

Hlavním cílem mé diplomové práce bude zjistit příčinu vzniku vad v zadaném odlitku. Možné hypotézy potenciálních příčin vzniku vad jsou následující:

1. Reakce kovu s pecní vyzdívkou
2. Reakce kovu s okolním prostředím – vzduch
3. Reakce kovu se struskou
4. Reakce kovu se skořepinou – primární obal
5. Vliv teploty lití a přehřátí v peci

Jednotlivé faktory ovlivňující následnou kvalitu produktů se zcela jistě ve většině případů prolínají. Mým úkolem bude zjistit, zda a popřípadě, který z nich bude mít dominantní dopad a na základě těchto informací navrhnout případnou změnu v technologii výroby. Většina teoretické části související s potenciálními příčinami vzniku vad bude popsána v druhé kapitole *Technologie přesného lití a klasifikace vad v této technologii*.

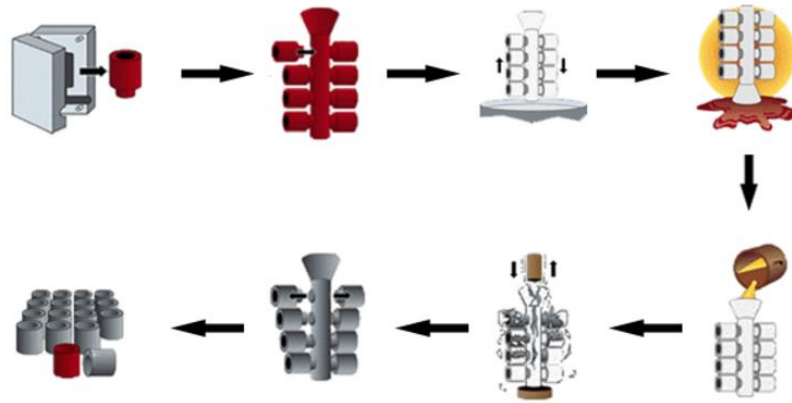
## 2 Technologie přesného lití a klasifikace vad v této technologii

Obecně lze za přesné lití označit všechny metody lití, které umožňují vyrobit odlitek přesněji než běžné slévárenské metody. Jedná se především o metodu vytavitelného, spalitelného nebo rozpustného modelu. V této práci se zabývám pouze litím přesného odlitku metodou vytavitelného modelu. Touto metodou lze vyrábět velmi složité odlitky s přesnými dutinami, otvory a drážkami, nehledě na možnost použití slitin s vysokou tavicí teplotou. Pro některé aplikace je přesnost a drsnost povrchu natolik postačující, že není třeba provádět žádné následné obráběcí operace. V případech, kde se opracování vyžaduje, jsou přídatky na obrábění poměrně malé a spotřeba času na jejich dokončení, a s tím i spojené náklady, jsou podstatně nižší než u jiných metod lití. [1]

Technologie přesného lití vytavitelným modelem je poměrně náročný a dlouhý proces. Přípravy forem pro lisování a vstřikování vosků, výroba voskových modelů a dále jejich sestav, obalování stromečků do několika keramických obalů, vytavování vosku, vypalování skořepin, následně jejich příprava pro lití, samotné odlévání, mechanické vytloukání odlitků ze skořepin, odstranění vtoků a nálitků, odstranění zbylé keramiky, opravy případných vad, veškeré dokončující operace a závěrečná kontrola jsou jen základní operace, které se doplňují spoustou dalších činností. Vyladění takového procesu spotřebuje spoustu času a s tím spojených nákladů. Z toho důvodu se tato technologie používá především pro zakázky o větších sériích.

### 2.1 Proces přesného lití ve slévárně Prague Casting services

Celý proces metody lití vytavitelným modelem je poměrně dlouhý a náročný. Během celé řady činností, od kontroly vstupních surovin až po expedici odlitků, mohou vznikat komplikace, a proto se celý proces musí průběžně kontrolovat. Příkladem je kontrola voskových modelů na kvalitu povrchu a rozměrů. Pokud se do výroby dostane nevyhovující voskový model, veškeré navazující činnosti, až po vizuální kontrolu a kontrolu rozměrů odlitého kusu, jsou zbytečné a stojí firmu spoustu peněz.



**Obr. 1: Proces přesného lití [2]**

Prvním krokem metody přesného lití vytavitelným modelem je výroba voskového modelu. Lze použít také model plastový, nicméně s vosky se snadněji pracuje, lze je jednoduše vytavit a recyklovat. Každému budoucímu odlitku náleží jeden voskový model. Forma na voskové modely, vyrobená například z hliníkových slitin, se skládá z více komponentů, jejichž počet je určen technologickým postupem vyjímání modelů z forem. Rozměry formy musejí zahrnovat smrštění vosku tak, aby výsledný model odpovídal rozměrům požadovaných zákazníkem. Vstřikování vosků se provádí na speciálních hydraulických lisech, které po uzavření formy vstříknou vosk o teplotě pohybující se v průměru okolo 65 až 70 °C a po předepsané době se otevřou. Tlak zajišťující neprodyšnost formy, tlak vstřikovaného vosku, teplota vosku, doba vstřikování a doba tuhnutí vosku jsou základními parametry, které určují kvalitu voskového modelu. Některé složitější modely, u nichž by po vyjmutí z formy hrozila deformace, se upevní do kalibračního přípravku, čímž se dosáhne jeho požadovaného tvaru a rozměrů.



**Obr. 2: Hydraulický lis MPI**



**Obr. 3: Forma na voskové modely**

Neupravený voskový model se musí ohrotovat. To znamená pečlivě skalpelem očistit přechodové hrany, dělicí rovinu a případné další voskové otřepy, které vzniknou během

lisování. Po očištění je model připravený na připevnění ke vtokové soustavě, která je také vosková a lisuje se stejně jako samotné modely. K jedné vtokové soustavě se přilepí několik voskových modelů a tak vzniká sestava označovaná jako stromeček. Snižování nákladů na výrobu lze regulovat právě počtem modelů v sestavě.



**Obr. 4: Hrotování voskového modelu**



**Obr. 5: Sestava modelů na vtokové soustavě**

Následuje výroba skořepinové formy. Připravené a zkontrolované voskové stromečky se odmastí a po vysušení se zahájí obalování. Postupně se stromečky namáčejí do keramické kašovitě hmoty, která se skládá z pojiva a plniva, a zaspávají se žáruvzdorným materiálem o různé zrnitosti. Obal se tvoří ve více vrstvách dle pevnostních požadavků na skořepinu. Jednotlivé vrstvy na alkoholové bázi se nechávají chemicky vytvrdit plyným čpavkem, nicméně první tři obaly na vodní bázi se musejí nechat vysušit cca 5 hodin. Během celého procesu se musí udržovat předepsaná vzdušná vlhkost a teplota, zejména z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti keramických materiálů a vosků, která způsobuje popraskání obalu. [2,3]



**Obr. 6: Obalování stromečků**



**Obr. 7: Automatická linka na výrobu skořepinových forem**

Po vytvrzení posledního obalu následuje vytavení vosku v autoklávu, tedy zařízení, které využívá k vytavování vosku sytou páru při teplotě 150 až 200 °C. Skořepiny se umísťují tak, aby z nich vosk mohl co nejsnadněji vytéct. Jelikož některé formy mají složitější tvar a všechen vosk by nebylo možné odstranit pouze jedním výtokem, tedy v podstatě vtokovou jamkou stromečku, připevňují se na povrch sestavy v klíčových bodech tzv. vytavovací kolíky. Ty ve skořepině vytvoří kanály, kterými se tekutý vosk dostává v autoklávu ze skořepiny. Vosk se zachycuje a lze ho použít k recyklaci. Největší komplikací procesu je vysoká tepelná roztažnost vosku a nízká tepelná roztažnost skořepiny, což může vést k popraskání keramické skořepiny. Nicméně tepelným šokem lze zajistit, aby v místě kontaktu primárního obalu skořepiny a voskového modelu se vosk natavil a vznikla tzv. dilatační spára, která kompenzuje vzniklé deformace vosku. [2,3]

Vypalování skořepin, jako další operace, slouží především k přechodu  $\text{SiO}_2$  z amorfního stavu do krystalického za současného dodatečného odstranění všech nečistot a zbylých těkavých látek, jako je vosk. [3]



Obr. 8: Autokláv na vytavování vosku



Obr. 9: Vypalovací pec na skořepiny



Obr. 10: Výplach skořepin



Obr. 11: Zabal skořepin

Nedílnou součástí lícího pole je příprava skořepin pro samotné lití. Zde se vizuálně zkontroluje stav primárního obalu, zda je souvislý bez porušení a celková soudržnost celé skořepiny. V případě menších defektů je možné skořepinu dodatečně opravit keramickým tmelem. Následuje výplach skořepiny vodou, její finální začištění a vysušení. Posledním krokem na přípravě skořepin je zábal do sibalové vaty různých tloušťek, která zajišťuje usměrněné tuhnutí odlitků.

V plynové peci se skořepiny nahřejí zhruba na 1100 °C, tedy na maximální možnou teplotu, aby nedocházelo k teplotním šokům při odlévání kovu. Tím se omezí vnitřní pnutí ve skořepině, které by mohlo vést k jejímu popraskání. Samotné odlévání do skořepin se provádí ve vakuových nebo indukčních pecích (otevřené lití). Sortiment odlitků je pestrý, a proto se taví nejrůznější materiály, jako jsou vysokolegované oceli, různé slitiny niklu nebo kobaltu.



**Obr. 12: Předehřívací plynová pec**



**Obr. 13: Vakuové lící pece**

Mezi následující operace patří vytloukání odlitků ze skořepin, oddělení vtokové soustavy od odlitku, louhování, tryskání, omílání, broušení a kontrola jakosti odlitků. Jedná se o celou řadu operací, přičemž není nutné, aby každý odlitek absolvoval kompletně všechny.

Vytloukání odlitků se provádí mimo výrobní halu, v separované odvětrávané místnosti, zvláště z důvodu prašnosti a velkého množství odpadu. Odlitky se dostávají z keramických skořepin ručně kladivem, a pokud tak nelze, používá se pneumatické kladivo. Důležité je nepoškodit za žádných okolností samotný odlitek. Proto se úder kladivem vedou pouze do částí vtokové soustavy.





**Obr. 14: Odstraňování keramiky**



**Obr. 15: Odstraňování vtokové soustavy**

Odřezávání odlitků od vtokové soustavy je mnohdy složitá a náročná práce, zejména pokud se jedná o složitější vtokovou soustavu a tvrdý materiál. Používají se převážně kotoučové pily různých velikostí. Oddělení odlitků je hrubá operace, pracovník se pokusí odstranit co největší množství nálitků, jelikož řezání kotoučovou pilou je poměrně rychlá operace. Nicméně nesmí dojít k poškození odlitků. Zbytek nálitků a vtoků se musí odstraňovat v následujících operacích.

Odstraňování zbylé keramiky, která zůstává v rozích nebo dutinách odlitků, probíhá dvěma způsoby. Prvním je tryskání, tedy abrazivní metoda. Odlitek se umístí do určeného uzavřeného prostoru a nechá se proudem brusiva otryskávat. V případě slévárny Prague Casting Services se jako abrazivo používají ocelové kuličky pro hrubší aplikace a jemný korund (sablux) pro většinu odlitků v rámci konečného cídění, jež je unášeno tlakovým vzduchem. Druhá metoda je chemická, kdy se keramika rozpouští ve vodném roztoku NaOH při teplotě až 110 °C. Ta se využívá především pro odlitky s jádry, kam se proud brusiva při tryskání nedostane. Tato operace je ale časově náročná, proto se používá jen v nutných případech.



**Obr. 16: Otryskávání odlitků**



**Obr. 17: Tryskací kabina**

Mezi dokončující operace se zařazují operace, kterými se odlitky začisťují, tedy cídí. Zabrušují se zbytky vtoků, nálitků, odstraňují se povrchové vady, různé otřepy apod. Pokud je třeba opravit nějakou větší povrchovou vadu, musí se vybrousit a zavařit, ovšem pouze v případě, pokud to specifikace zákazníka dovolí. Využívá se spousta speciálních zařízení a nástrojů, jako jsou například ruční pásové nebo úhlové brusky různých velikostí, přístroje k odhroťování otvorů, pneumatická gravírovací pera nebo stroje k omílání.



**Obr. 18: Nářadí používané na cídírně**



**Obr. 19: Omílání**

Kontrola jakosti odlitků je souhrn velice důležitých operací, které jsou nedílnou součástí výroby. Jedná se o vizuální kontrolu, BLD kontrolu, 3D kontrolu a RTG kontrolu, které se provádějí na hale v rámci výroby. Pokud se detekují nepřijatelné chyby, obvykle se okamžitě opravují v případě, že se nejedná o neopravitelný zmetek. Mimo tyto 4 kontroly se odlitky kontrolují z hlediska chemického složení, popřípadě na mechanické vlastnosti. Každá zakázka je specifická jak svým pracovním postupem, tak kontrolou.

Vizuální kontrolou odlitky procházejí jednak kvůli celkovému vzhledu, tak z důvodu kontroly tvarů a rozměrů. Jelikož je portfolio produktů slévárny poměrně široké, nachází se na vizuální kontrole celá řada nejrůznějších měřicích a kalibračních přípravků a měřidel. Právě mezi tímto oddělením kontroly a cídírnou se většinou odlitky vyměňují s největší frekvencí, aby se dosáhlo co nejvyšší kvality odlitku s ohledem na stav jeho povrchu a tvaru.



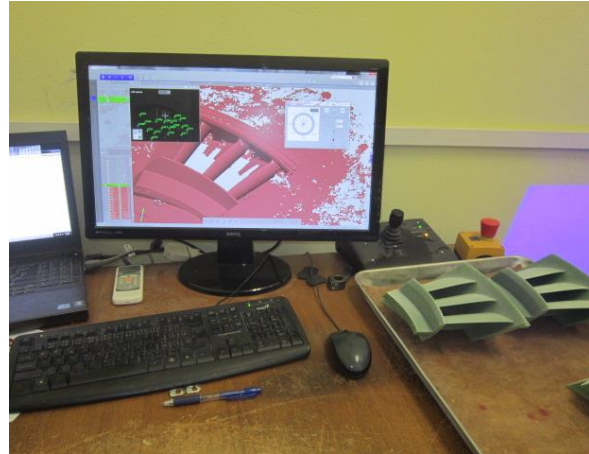
**Obr. 20: Pracoviště vizuální kontroly**

BLD kontrola využívá barevně luminiscenční metodu detekce povrchových vad. Jedná se o nedestruktivní, kapilární metodu. Princip spočívá ve smáčivosti a vzlínivosti některých kapalin (penetrantů) a jejich barevnosti nebo fluorescenci. Penetrant se aplikuje na povrch odlitku a dostane se až do povrchové vady. Po odstranění přebytku penetrantu pomocí vývojky vzlíná z vad zpět na povrch, kde tvoří barevnou nebo fluorescenční indikaci povrchové vady. V našem případě se využívá metoda fluorescenční, která po ozáření odlitku ultrafialovým zářením indikuje vady zeleným nebo zelenožlutým fluoreskovaním. [4,5]

3D rozměrová kontrola se aplikuje jak pro odlitky, tak pro voskové modely. Než se voskový model použije do sestavy, je třeba mnohdy i více iteracemi dosáhnout jeho požadovaného tvaru a rozměrů. Kontrola voskových modelů se provádí pouze u modelů náchylnějších na změnu tvaru nebo rozměrů během tuhnutí vosku, ovšem zabrání se tak výrobě zmetků již na počátku výrobního procesu. Pokud by se voskové modely nekontrolovaly, docházelo by k velkým peněžním ztrátám spjatých se všemi operacemi po lisování. Z odlitků se pak skenují také ty, které jsou náchylné na změnu tvaru. Zejména různé segmenty, složené z tenkých lopatek a poměrně masivních přírub, mají tendenci se ochotně deformovat. Díky výsledkům z 3D skenování lze také pružně reagovat na případnou změnu ve voskové sestavě, kde lze upravit vtokovou soustavu takovým způsobem, aby se vyztužily nejvíce deformované části.

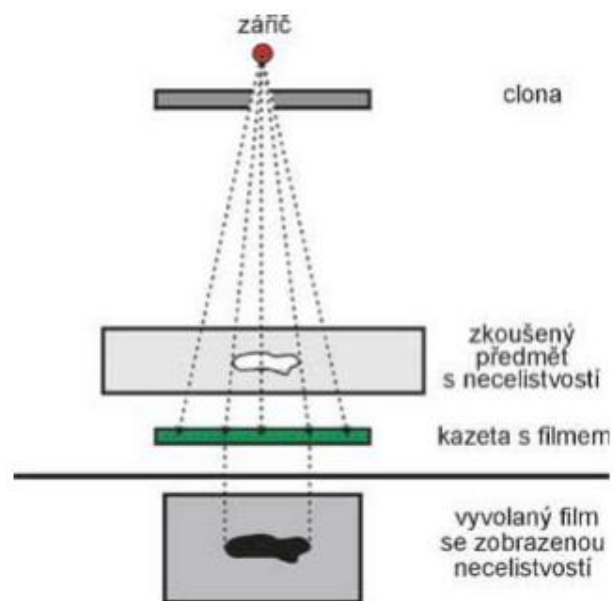


Obr. 21: 3D skenování



Obr. 22: 3D kontrola - vyhodnocování

RTG kontrola je nedestruktivní zkouška, která zjišťuje vnitřní vady odlitků (staženiny, porezita, vměstky apod.). Jedná se o rentgenové záření, tedy elektromagnetické vlnění s malou vlnovou délkou. Princip spočívá ve změně intenzity záření vlivem změny tloušťky materiálu, chemického složení, množství vad, dutin atd. Záření prochází materiálem a je zachycováno na citlivou vrstvu fotografického materiálu. Rozlišná intenzita způsobuje rozdílné zbarvení filmu. Dutiny a staženiny pak jsou na filmu zachycené jako zčernalé oblasti ve světlejším prostředí tlustší vrstvy materiálu. [6,7]



Obr. 23: Princip prozařování odlitků rentgenovým zářením [6]

Mimo tyto běžné kontroly se pak dle požadavků zákazníka zjišťuje chemické složení odlitků s použitím optického spektrometru. Například u zadaného odlitku popsaného v *Kap. 4* se určuje chemické složení u každého odlitku. Pro tento účel je na těle odlitku umístěn přílítek, který se po odlití odřízne, provede se chemický rozbor a archivuje se. Pro zjišťování mechanických vlastností se v rámci vývoje odlévají z daného materiálu přímo zkušební vzorky.

V některých případech se odlitky v rámci výrobního procesu také tepelně zpracovávají. Dosahuje se tak požadovaných mechanických vlastností, požadované vnitřní struktury materiálu a v případě tzv. „hipování“ také opravy některých typů vad. Izostatické lisování za tepla (HIP) se provádí za účelem ztuhnutí kovových slitin pomocí vysokého tlaku plynu a vysoké teploty, kdy dochází k odstranění vnitřní poremity díky plastické deformaci a difuznímu spojení. [8]

## 2.2 Žárovzdorné materiály pro pecní vyzdívky

Žárovzdornost je definována jako schopnost nezatíženého materiálu odolávat vysokým teplotám, aniž by došlo k jeho roztavení. Právě při vysokých teplotách se materiál začne natavovat. S narůstajícím podílem taveniny a snižováním jeho viskozity materiál postupně ztrácí soudržnost a dochází k jeho deformaci. Žárovzdorná pecní vyzdívka má za úkol oddělovat prostor pro průběh technologických procesů od okolí a zároveň snižovat tepelné ztráty pece. Obvykle se vytváří v několika vrstvách. Hlavním požadavkem je, aby odolávala vysokým teplotám, působení okují a strusek, tavenému materiálu z mechanického i chemického hlediska zatížení, plynům, spalinám, změnám teploty apod. Žárovzdorné materiály lze dělit dle jejich chemicko-mineralogického složení, pórovitosti, formy, ve které se používají (tvarové, zrněné) a podle tepelného zpracování (pálené, nepálené atd.). Tvarové výrobky lze připravit lisováním, formováním nebo je odlévat ze suspenzí. [9,10,11]

Tvarové žárovzdorné materiály lze dále rozdělit dle jejich chemicko-mineralogického složení do 10 základních skupin: [9]

*Křemičité materiály* – Pokud mají obsah  $\text{SiO}_2$  větší než 93 %, nazývají se dinas. Dinasy s příměsí pak obsahují  $\text{SiO}_2$  v menším zastoupení. Sloučenina  $\text{SiO}_2$  se vyskytuje v několika modifikacích, které se od sebe liší uspořádáním atomové mřížky.

Mezi výhody dinasu patří jeho nízká teplotní roztažnost nad 600 °C, v porovnání se šamotem je to vyšší pevnost v tlaku, vysoká odolnost proti deformaci v žáru při zatížení nebo odolnost proti působení kyselých strusek. Naopak v oblasti krystalografických přeměn dochází k poklesu pevnosti v tahu a ohybu, je málo odolný vůči náhlým změnám teploty do teploty 600 °C a má vysoký součinitel teplotní roztažnosti.

Z důvodu zlepšení některých vlastností se do dinasu přidávají příměsí. Jedním z modifikovaných dinasů je *dinaschromit* s přísadou chromové rudy, který se vyznačuje zvýšenou odolností vůči struskám. *Dinazirkon* obsahuje zhruba 50 %  $\text{SiO}_2$  a 48 %  $\text{ZrO}_2$ . Jedná se o kyselý žárovzdorný materiál s vyšší měrnou tepelnou vodivostí a nízkou tepelnou

roztážností. Posledním zmíněným zástupcem ze skupiny dinasů s přísadami je *dinas s karbidem křemíku*, který je charakteristický vyšší pevností v tlaku a odolností proti otěru.

Dinas se využívá zejména pro koksárenské baterie, elektrické obloukové pece, hlubinné pece a také pro indukční tavicí pece.

*Hlinitokřemičité materiály* – Jde o nejpoužívanější skupinu žárovzdorných materiálů.  $Al_2O_3$  a  $SiO_2$  jsou základní žárovzdorné složky a jejich poměr určuje charakteristické vlastnosti pecních vyzdivek. *Křemičitošamotové materiály* se používají u koksárenských baterií pro vyzdívku kanálů. Označují se jako kyselé šamoty SK. V porovnání se šamotem mají nižší žárovzdornost, nižší odolnost vůči změnám teploty a horší odolnost proti deformaci. *Šamotové materiály* patří mezi nejpoužívanější pro stavbu pecí. Mezi jejich výhody patří především odolnost proti změnám teplot v celém teplotním rozsahu použití, nejsou však odolné vůči působení strusek a při teplotách nad  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  dochází k vyššímu opotřebením vyzdívky. Jakost šamotových materiálů souvisí s jejich chemickým složením. Čím více je zastoupen  $Al_2O_3$ , tím roste žárovzdornost a odolnost proti deformaci. Naopak s větším podílem  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  a  $Fe_2O_3$ , tyto vlastnosti klesají. Používají se pro koksárenské baterie, elektrické obloukové pece, ohřívací pece nebo pro vysoké pece. Kaolinit, sillimanit, mullit a korund jsou *hlinitokřemičité materiály s vyšším obsahem  $Al_2O_3$*  (nad 45 %) využívané v různých částech vysoké pece, ve strkacích pecích nebo v ocelářských pánvích.

*Hořečnaté a hořečnatospinelové materiály* - Materiály zařazené do této skupiny jsou chemicky zásadité a odolné proti roztaveným kovům a struskám. V porovnání s dinasami a šamoty se vyznačují vyšší tepelnou vodivostí. Vyšší odolnost proti deformaci a žárovzdornost zaručuje u *magnezitu* periklas  $MgO$ . *Magnezitchrom* obsahuje chromovou rudu a je odolný proti působení vysokých teplot. Dalšími materiály jsou *chrommagnezit*, který je vysoce odolný proti náhlým změnám teploty a *chromit*, vyráběný z chromové rudy, odolný také proti změnám teplot, používaný jako mezivrstva mezi kyselými a zásaditými vrstvami.

*Hořečnatovápenaté materiály* – Poměr mezi hlavními složkami  $CaO$  a  $MgO$  určuje, zda jsou materiály označovány jako vápenatodolomitové, magnezitodolomitové nebo dolomitomagnezitové. Charakteristické jsou odolností vůči náhlým změnám teploty.

*Hořečnatokřemičité materiály* – Jsou vysoce odolné proti náhlým změnám teploty, ale nejsou odolné proti působení zásaditých strusek. Žárovzdornost zajišťují oxidy  $MgO$ ,  $SiO_2$ , popřípadě  $Cr_2O_3$ .

*Zirkoničité materiály* – Vlastnosti zirkoničitých materiálů závisí na obsahu  $Zr_2O_3$ . Mezi další základní složky patří pak  $SiO_2$  a  $Al_2O_3$ . Jejich žárovzdornost se pohybuje v teplotním rozmezí 1750 až 1820 °C a jsou odolné proti struskám a roztaveným kovům. Používají se na výrobu tvarovek pro vyzdívky pánví, hořákové tvarovky nebo na výrobu kelímků, zátek a výlevek pro lící pánve.

*Uhlíkaté materiály* – Vyznačují se vysokou žárovzdorností, odolností proti náhlým změnám teploty a malou délkovou teplotní roztažností. Uhlík je zastoupen ve formě grafitu nebo tuhy.

*Křemičítokarbidové materiály* – Základní složkou je SiC. Mají vysokou měrnou tepelnou vodivost, pevnost v tlaku, jsou odolné proti deformaci, otěru a náhlým změnám teplot. Na druhou stranu nejsou odolné proti působení zásaditých strusek a roztavené oceli. Vyrábí se z nich trubky rekuperátorů nebo ochranné trubice termočlánků.

*Speciální žárovzdorné materiály* – Používají se pro laboratorní a technické zařízení s vysokými pracovními teplotami jako jsou jaderné reaktory nebo trysky reaktivních motorů. Skládají se z oxidů, boridů, silicidů, karbidů a sulfidů vysoké čistoty.

### 2.2.1 Porovnání výdusek Coral SXL a Dri-vibe 883

V průběhu analýzy problému pecní vyzdívky (jak bude uvedeno v *Kap. 5*) jsem kontaktoval ACESO PRAHA, s.r.o., která se od roku 1992 zabývá prodejem zařízení a poradenskými službami pro slévárny, s žádostí o radu jakou pecní vyzdívkou použít pro daný typ indukční pece a pro daný materiál. V této kapitole jsem provedl porovnání dvou pecních výdusek Coral SXL od firmy CAPITAL REFRACTORIES s.r.o., která se používá běžně ve slévárně Prague Casting Services a.s. pro zadaný druh odlitku s výdusku Dri-vibe 883A, nabízenou právě firmou ACESO. [12,13]

#### *Dusací hmota Coral SXL (Capital refractories)*

Jedná se o suchou, spinel tvořící směs, používanou pro výdusku indukční pece ACEC. Hmota po vysušení a sintraci vytváří velmi tvrdý, spečený povrch v oblasti, kde dochází ke kontaktu s taveninou. Na zadní straně výdusky zůstává nespečený, práškovitý povrch. Vzhledem k tomu, že výduska reaguje neutrálně, lze ji použít pro tavení oceli a vysoce legovaných, neželezných kovů v indukční peci.

Dusací hmota je dodávána v pytlích jako hotová hmota, nevyžaduje žádné další úpravy mimo zvlhčení. Spotřeba hmoty na výdusku kelímku je 5 pytlů (125 kg). [14]

Chemické složení je uvedeno v *Tab. 1*:

**Tab. 1: Chemické složení dusací hmoty Coral SXL [14]**

Složka	[Hm. %]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Min. 83,0 – 86,0
MgO	Min. 12,0 – 15,0
SiO <sub>2</sub>	Max. 0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Max. 0,5
CaO	Max. 0,5

Zrnitost výdusky odpovídá *Tab. 2*:

**Tab. 2: Zrnitost dusací hmoty Coral SXL [14]**

Velikost zrna [mm]	Zastoupení [%]
1 až 6	43 ± 8
0,06 až 1	32 ± 8
Pod 0,06	25 ± 8

**Tab. 3: Další parametry dusací hmoty Coral SXL [14]**

Objemová hmotnost suché výdusky	2800 až 2900 kg.m <sup>-3</sup>
Běžný provoz pece	do lící teploty 1700 °C
Krátkodobý provoz pece	do lící teploty 1750 °C
Cena	52,30 Kč/kg
Příprava	Dusání pneumatickou vibrační pěchovačkou

Spékání kelímku:

1. Vyčistit vnitřek zapěchované šablony od zbytků dusací hmoty. Do šablony postupně vkládat připravenou vsázku z nízkouhlíkaté a nízkolegované oceli.
2. Vsázku postupně pozvolna zahřívat do červeného žáru rychlostí cca 300 °C/hod po dobu 2,5 až 3 hodin.
3. Po natavení vsázky opatrně odstranit horní část neroztavené šablony a zahřát tekutý kov na teplotu cca 1680 °C. Celková doba od začátku spékání do dosažení teploty 1680 °C by měla být 4,5 hod.
4. Výdrž na teplotě 1680 °C je pak 60 min. Po této době tekutý kov pozvolna přelít do lící pánve tak, aby se vysušil lící žlábek pece.
5. Po vylití pece provést prohlídku kelímku na výskyt prasklin a případně provést opravu prasklého límce pece. [14]



*Dusací hmota Dri-vibe 883A (ACESO)*

DRI-VIBE® 883A je suchá vibrovatelná výduska s korundovým spojením, určená pro bezjádrové indukční tavicí pece pro tavení širokého rozsahu uhlíkatých, nerezových a vysoce legovaných nástrojových ocelí. DV883A je nejlepší pro použití za teplot od 1482 °C do 1649 °C. Tento materiál poskytuje následující vlastnosti a výhody: [15]

- Plně suchý
- Vysoká odolnost proti chemickému opotřebení
- Korundové spojení pro vysoce teplotní stabilitu a odolnost

Chemické složení je uvedeno v *Tab. 4*:

**Tab. 4: Chemické složení dusací hmoty Dri-vibe 883A [15]**

Složka	[Hm. %]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88,2
MgO	11,1
SiO <sub>2</sub>	0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2
CaO	0,1

**Tab. 5: Další parametry dusací hmoty Dri-vibe 883A [15]**

Zrnitost výdusky	8 mm (5/16 mesh) a menší
Měrná hmotnost	3 120 kg.m <sup>-3</sup>
Běžný teplotní limit	1815°C
Minimální použitelná teplota	1427°C
Cena	1,43 euro (cca 38,60 Kč)/kg
Příprava	Dusání pneumatickou vibrační pěchovačkou

Dusací hmota je balena v papírových pytlicích o hmotnosti 25 kg. Na paletách 1067 x 1067 mm (42“ x 42“) se přepravuje po 64 pytlech (1600 kg) chráněných pružným obalem. Doporučuje se skladovat na suchém místě, aby nedošlo k navlhnutí materiálu po dobu maximálně jednoho roku.

**Tab. 6: Spékání dusací hmoty Dri-vibe 883A [15]**

Konečná teplota pro držení	1595 °C
Rychlost sintrace	222 °C/h

### Závěr

Využitím poradenské služby firmy ACESO PRAHA s.r.o. jsem dospěl k závěru, že obě dusací hmoty se od sebe příliš neliší. Jejich chemické složení se liší minimálně. Žárovzdornost u obou materiálů zajišťují v první řadě oxidy hliníku a potom také oxidy hořčíku. Výhodou nabídnuté dusací hmoty DV883A je vyšší udávaný teplotní limit pohybující se okolo teploty 1815 °C a především nižší cena zhruba o 13,60 Kč/kg.

## 2.3 Interakce mezi taveninou a formou

Jedním z předpokladů, co může ovlivňovat kvalitu odlitků, je také vzájemné působení roztaveného kovu s formou. Tato kapitola popisuje obecnou interakci mezi kovem a jakýmkoliv formami. Při kontaktu dochází mnohdy k nežádoucím dějům, které se prolínají a jsou příčinou vad a snížené jakosti odlitků. Vzájemné působení zahrnuje: [16]

- Mechanické namáhání formy
- Erozivní poškozování formy
- Pronikání taveniny do formovacího materiálu
- Tepelné namáhání formy a změnu jejích vlastností
- Uvolňování a přechod plynů a některých prvků
- Chemické reakce mezi složkami slitiny a formovacího materiálu

Metalostatický tlak působí na vnitřní stěny formy a na jádra. V důsledku dochází k porušení spodní části formy nebo vyboulení stěn, dále pak k posunutí, deformaci nebo prasknutí jader. Je dán velikostí: [16]

$$p = h \cdot \rho_{tav} \cdot g \quad (1)$$

Kde:  $h$  – výška hladiny nad zkoumaným místem

$\rho_{tav}$  – měrná hmotnost taveniny

$g$  – gravitační zrychlení

Je nutné tedy volit optimální tloušťky stěn forem, připravit je dle předepsaného postupu, případně vyztužit. Dalšími variantami jsou užití pevnějších formovacích materiálů jak pro formy, tak pro jádra. Jádra lze také podepřít nebo vyztužit.

Dynamický účinek proudu tekutého kovu způsobuje erozi především ve vtokové soustavě, nebo ve formě v blízkosti zaústění vtoku. Vymílání materiálu z formy lze omezit vhodným naklopením formy, aby proud nenarážel na stěnu pod úhlem 90°. Příznivě působí také snížení rychlosti taveniny při plnění, například zmenšením průřezu vtokových kanálů nebo vhodné usměrnění proudu u vstupu do formy.

Určité hodnoty tlaku a povrchového napětí mezi formou a kovem jsou příčinou penetrace, tedy pronikání taveniny do formovacího materiálu. Povrchové napětí bývá silně ovlivněno oxidovými povlaky na povrchu taveniny. Penetrací taveniny do formy má smysl se zabývat pouze u větších tloušťkách stěn. U tenkostěnných odlitků tavenina rychleji chladne a neproniká v takové míře do formovací směsi.

Během odlévání do forem se formovací materiál rychle zahřívá až téměř na teplotu lití. Tím dochází k řadě fyzikálních a chemických dějů, které ovlivňují konečnou jakost odlitků. Základní složkou většiny formovacích směsí je křemenný písek, zejména z důvodu jeho vhodných vlastností, jako je žáruvzdornost, pevnost a tvrdost, a pak také kvůli jeho hojnému výskytu v přírodě. Oproti jiným ostřivům má však poměrně velkou teplotní roztažnost spojenou s výraznými objemovými změnami při změně krystalické mřížky. [16]

**Tab. 7: Žáruvzdornost vybraných materiálů [16]**

Materiál	Teplota [°C]
Křemenný písek (přírodní)	1200 - 1600
Křemen	1700
Šamot (25 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 55 % SiO <sub>2</sub> )	1450 - 1600
Mullit (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> )	1855
Korund (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1800 - 2020
Zirkon (ZrSiO <sub>4</sub> )	2100
Chromit (FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	2180
Magnezit (MgO)	2200 - 2800
Grafit	3000 - 3600

V případě pískových forem nízkotavitelné příměsi v křemenném písku, jako jsou živce, slída, uhličitany nebo oxidy některých prvků, způsobují spékání písku s povrchem odlitku (tepelné zapékání). Náchylná jsou především místa, kde se forma značně prohřeje (silné průřezy odlitku, ostré hrany).

Chemické zapékání je způsobeno chemickými reakcemi mezi kovem a formou, kdy vznikají látky s nízkou teplotou tavení. Náchylné bývají nedostatečně dezoxidované slitiny.

Reakce je možné omezit snížením teploty lití, dokonalejší dezoxidací, přísadami vytvářejícími ve formě redukční atmosféru nebo ochrannými nátěry formy. K nejvýznamnějším reakcím patří rozklad vodní páry za vzniku oxidů a vodíku, který proniká do odlitku. Dále lze zmínit nauhličování povrchu odlitků například při lití titanu do grafitových forem nebo nízkouhlíkatých ocelí litých do forem s uhlíkatými přísadami.

V případě lití ocelí do keramických forem dochází vlivem prodyšnosti formy k oduhličení povrchu odlitku, způsobené reakcí atmosférického kyslíku s taveninou. [16]

### 2.3.1 Primární břečka

Primární břečka tvoří keramický obal, který přichází do styku s taveninou. Existuje tedy teoretická možnost, že hlavní příčinou snížené kvality odlitků je právě nevhodné chemické složení kontaktního obalu. Nicméně je třeba zdůraznit, že povaha vad, tedy jejich velikost a rozmístění, v podstatě tuto variantu vyvrací. Detekované vady jsou bodové nebo v podobě shluků bodů. Pokud by docházelo k chemické reakci mezi primárním obalem a taveninou, objevovaly by se vady jednak pouze na povrchu, a potom by se jednalo o plošné vady v podobě chemických připečenin, které by se projevily drsným a hrubým povrchem odlitku, vzniklým spečením formovací hmoty a povrchu odlitku. [17,24]

**Tab. 8: Složení primární břečky [17]**

Složení	Poznámka
Primcote	Pojivo
ZrSiO <sub>4</sub>	Plnivo
CoO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Plnivo

Primcote je mléčně bílá kapalná látka, která se používá jako pojivo do primárních hydrosolových břeček. Obsahuje smáčecí a odpěňovací přípravky, je nehořlavý. Nesmí zmrznout a musí být skladován při teplotě vyšší než 2 °C. Základní složkou je koloidní oxid křemičitý. ZrSiO<sub>4</sub> je zirkonová moučka, používaná jako plnivo a CoO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je plnivo v podobě modrého jemného prášku, jenž slouží jako nukleant k zjemnění zrna. [17,18,19,20]

## 2.4 Teplota materiálu

Zajištění vhodné teploty lití je jedním ze základních předpokladů získání bezvadného odlitku. Teplota lití má velký vliv na výskyt zavalenin a připečenin, související u tavení ocelí s poměrně vysokou lící teplotou. Dále má teplota lití vliv na vlastnosti, které úzce souvisejí s primární lící strukturou, především stupeň dendritického odmíšení a velikost primárních zrn

dendritů. Výskyt staženin a oxidických vměstků, nezaběhnutí v tenkostěnných částech odlitku nebo náchylnost k trhlinám, jsou také velmi závislé na teplotě taveniny. Zejména u středně legovaných a vysokolegovaných ocelí, které mají široký interval tuhnutí, větší smrštění, nižší teplotní vodivost a sklon ke tvorbě hrubého primárního zrna, je důležité zaručit správnou lící teplotu. [21]

## 2.5 Metoda LBI (Laminar Barrier Inerting for Induction Melting)

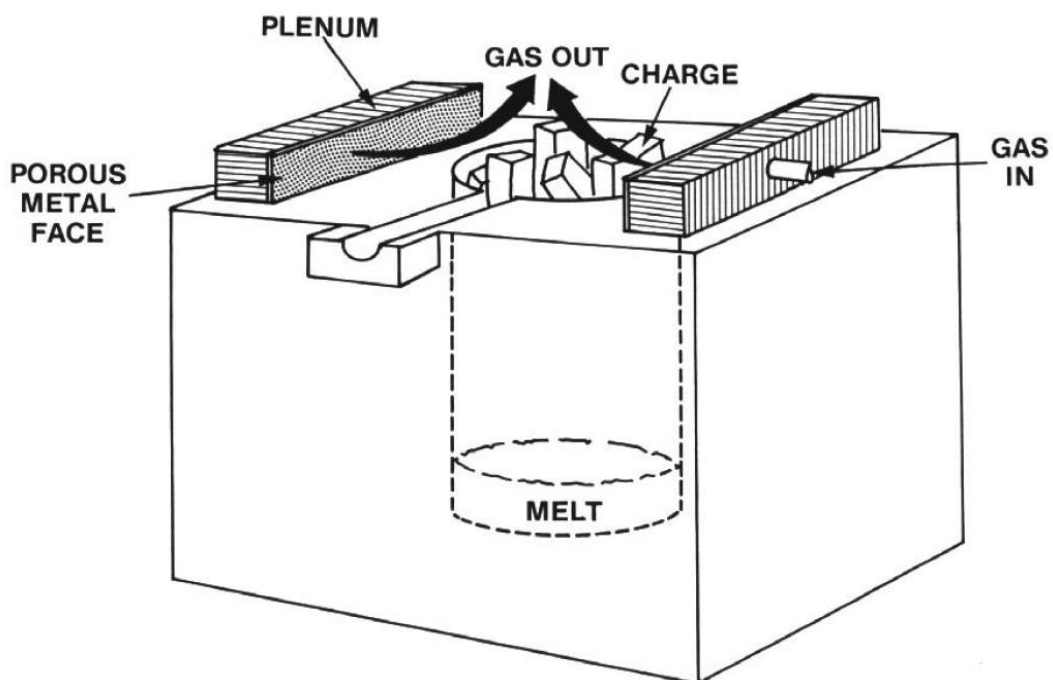
LBI je metoda využívaná ve slévárenství, jejíž podstatou je chránit taveninu inertním plynem během indukčního tavení materiálu. Byla vyvinuta a patentována společností UCIG (The Linde Division of Union Carbide Industrial Gases Inc.) za účelem eliminace kontaminace taveniny nežádoucími plyny. LBI je schopna udržet obsah kyslíku nad hladinou taveniny pod 1% během celého procesu, tzn. vkládání materiálu, tavení a přidávání legur. Tímto způsobem se tedy omezuje oxidace taveniny a tvorba strusky, kvalita odlitků se zlepšuje a zmetkovitost se snižuje. [22]

Pro vývoj byly jako inertní plyny použity argon a dusík. Rozsáhlé výzkumy měly určit množství kyslíku a dusíku nad taveninou a obsahy kyslíku, dusíku a vodíku v tavenině. Výsledky ukázaly, že LBI metoda je schopna udržet množství kyslíku nad hladinou taveniny v rozmezí 0,5 až 1,5 % a obsah dusíku od 15 % do 30 % v závislosti na proudění inertního plynu. Obsah kyslíku v tavenině byl nižší o 30 až 60 % než při běžném tavení ve volné atmosféře, zatímco obsah dusíku byl podobný nebo o něco nižší. Pokud je třeba množství dusíku omezit, musí se upravit poměr argonu vůči dusíku v proudění nad taveninou. Obsah vodíku se snížil oproti nechráněnému tavení o 40 až 75 %. Zároveň se snížila oxidace taveniny, tedy tvorba strusky, a tím se zvýšila životnost pecní vyzdívky. Potřebné zařízení k aplikaci LBI umožňuje během tavení vizuální kontrolu celé pece i přístup pro vkládání vsázky. Zvýšením kvality odlitků, především redukce oxidických vměstků, došlo v řadě případů k výraznému snížení zmetkovitosti. [22]

### 2.5.1 Princip fungování LBI

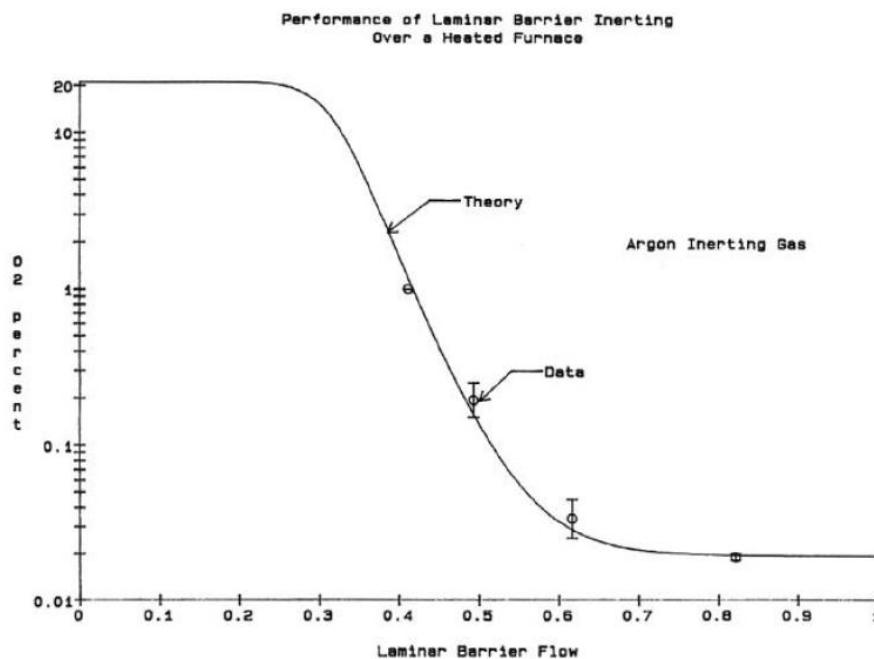
The Linde Division of Union Carbide Industrial Gases se zabývá především technologií zvanou „Gas Curtains“. Ve volném překladu se jedná o clony tvořené z plynu, které chrání hladinu taveniny během tavení. Tato plynová clona se zajišťuje obvykle trubkami ústící řadou malých otvorů, kterými je inertní plyn hnán přes taveninu. Inertní a zároveň čistící plyn je držen

nad hladinou a vytváří tak bariéru mezi taveninou a okolní atmosférou. Tímto způsobem ovšem dochází k turbulentnímu proudění plynu a není vyloučen kontakt taveniny s okolním vzduchem. Hlavní myšlenka LBI je turbulentní proudění přeměnit v laminární. [22]



*Obr. 24: Princip technologie LBI [22]*

Na *Obr. 24* je znázorněn princip LBI. Nad ústím pece jsou umístěny naproti sobě dva LBI elementy. Plyn (argon, dusík nebo jejich směs) je hnán skrze přívod do komory, odkud porézním průčelím proudí přes taveninu. Požadované laminární proudění tak vylučuje vmíchání okolního vzduchu do plynové clony a nedojde ke kontaktu s taveninou. Výhodou je neomezený přístup k tavenině v případě například vkládání vsázky. Obsah kyslíku v okolí taveniny závisí na spoustě faktorů, zejména na průměru kelímku, teplotě taveniny nebo složení použitého plynu. [22]



**Graf 1: Závislost obsahu kyslíku nad taveninou v závislosti na intenzitě proudění [22]**

V Grafu 1 je znázorněna závislost obsahu kyslíku na bezrozměrné hodnotě LBI, která vyjadřuje sílu proudění. Do hodnoty LBI 0,3 se prakticky nic neděje. Proudění nemá dostatečnou energii k vytvoření laminárního proudění chránící taveninu. V rozmezí hodnot 0,3 až 0,6 však obsah kyslíku rapidně klesne o 3 řády. V tomto modelovém případě klesl obsah kyslíku až na 200 ppm. Od hodnoty 0,7 se ustálí obsah kyslíku a zůstává konstantně na dolním limitu.

Zatím nebyly stanoveny žádné horní hranice rozměrů kelímku. Snadno byl chráněn i povrch o průměru 40 cm. [22]

### 2.5.2 Experiment

Experiment se prováděl v indukční peci (1000-lb, tedy něco kolem 450 kg vsázky) ve slévárně přesného lití. Výrobní portfolio se skládalo z odlitků z různých materiálů. Používaným materiálem byly korozivzdorné oceli, korozivzdorné oceli se sníženým obsahem uhlíku, kobaltové a niklové slitiny (konkrétně: CF-8M, CK-20, 17-4PH, 4140, 8620, 86SA, monely).

Nainstalováním LBI zařízení nedošlo ke změně technologického postupu, jelikož jednou z výhod je neomezený přístup do pece jako u klasického nechráněného tavení inertní atmosférou. Celkem se provedlo 70 taveb (tzn. použití cca 35 tun materiálu) s použitím i bez použití LBI kvůli porovnání výsledků. Inertním plynem byl dusík spolu s argonem. Jejich poměr

se měnil a zjišťoval se dopad na obsah kyslíku a dusíku nad taveninou a na obsah dusíku v tavenině. Během procesu tavení se také průběžně kontroloval obsah kyslíku a dusíku nad hladinou. Na konci natavení materiálu, dolegování a ustálení na požadované teplotě se odebraly z taveniny vzorky na analýzu obsahu kyslíku, dusíku, vodíku a vzorky strusky na analýzu ztrát způsobených oxidací. [22]

**Tab. 9: Odlévané slitiny a jejich chemické složení [22]**

Slitina	Prvek [%]											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	W	Cb	N	Fe
17-4PH	0,07	0,70	1,00	15,5-17,7	3,60-4,60	-	2,50-3,20	-	-	0,15-0,35	0,05	Bal.
CK-20	0,20	1,50	1,50	23,0-27,0	12,0-15,0	0,50	-	-	-	-	-	Bal.
CF-8M	0,08	1,50	1,50	18,0-21,0	9,00-11,0	2,00-3,00	-	-	-	-	-	Bal.
Ni-Base	0,20	1,00	1,00	20,5-23,0	Bal.	8,00-10,0	-	0,50-2,50	-	-	-	17,0-20,0
Co-Base	0,20-0,30	0,40-0,60	0,75-1,00	28,5-30,5	9,50-11,5	-	-	Bal.	6,50-7,50	-	-	2,00
Monel	0,30	1,50	3,50-4,50	-	Bal.	-	27,0-33,0	-	-	-	-	2,50
Carbon	0,3	0,70	0,60	0,50	0,40	0,20	0,30	-	-	-	-	Bal.
8620	0,15-0,25	0,60-1,00	0,60-0,80	0,40-0,70	0,40-0,70	0,15-0,25	-	-	-	-	-	Bal.
4140	0,35-0,45	1,00	0,80	0,75-1,10	-	0,15-0,25	-	-	-	-	-	Bal.

### 2.5.3 Výsledky

#### Obsah dusíku a kyslíku nad taveninou

Dle *Grafu 1* lze konstatovat, že obsah kyslíku v bezprostřední blízkosti taveniny je závislý na intenzitě průtoku plynu LBI zařízením. Hodnoty obsahu kyslíku mohou pak klesnout až k hodnotě 200 ppm. Množství dusíku lze pak regulovat poměrem argonu v proudícím plynu. Při průtoku 3400 SCFH (=standard cubic feet per hour) dusíku a 2600 SCFH argonu se dosáhlo obsahu kyslíku nad taveninou v rozmezí 0,5 až 1 % a obsahu dusíku 25 až 30 %. Při změnách poměru argonu vůči dusíku se pohybovaly hodnoty obsahu kyslíku nad taveninou od 0,3 % do 1,5 % a hodnoty obsahu dusíku od 12 % do 30 %. [22]



Obsah rozpuštěných plynů

Vzorky odebírané z taveniny ukázaly výrazný pokles obsahu kyslíku a vodíku, zatímco obsah dusíku se neměnil nebo nepatrně snížil v porovnání s běžným tavením na volné atmosféře. [22]

Tab. 10: Obsahy kyslíku v tavenině pro vybrané slitiny [22]

Obsah kyslíku [ppm]			
Slitina	Tavení s použitím LBI	Tavení bez LBI	Snížení obsahu kyslíku [%]
CF-8M	100 ± 14	190 ± 33	47,4
CK-20	140 ± 29	200 ± 26	30
Ni-Base	170	190	10,5
17-4PH	130	180	27,8
Co-Base	170	310	45,2
8620	45	120	62,5
4140	63 ± 11	75	16

Tab. 11: Obsahy dusíku v tavenině pro vybrané slitiny [22]

Obsah dusíku [ppm]		
Slitina	Tavení s použitím LBI	Tavení bez LBI
CF-8M	500	550
CK-20	860	920
Ni-Base	450	420
17-4PH	480	500
Co-Base	680	910
8620	130	130
4140	170	200
Carbon	110	120

Tab. 12: Obsahy vodíku v tavenině pro vybrané slitiny [22]

Obsah kyslíku [ppm]			
Slitina	Tavení s použitím LBI	Tavení bez LBI	Snížení obsahu kyslíku [%]
Monel	1,18	2,7	56,3
17-4PH	1,55	6,2	75
Co-Base	2,4	9,85	75,6

Z *Tab. 10* je vidět obsah kyslíku mezi hodnotami 45 a 170 ppm při použití LBI a mezi 75 a 310 ppm při tavení na vzduchu. Metoda LBI tedy snížila koncentraci kyslíku v tavenině o 30 až 60 % oproti tavení, kdy dojde ke kontaktu se vzduchem.

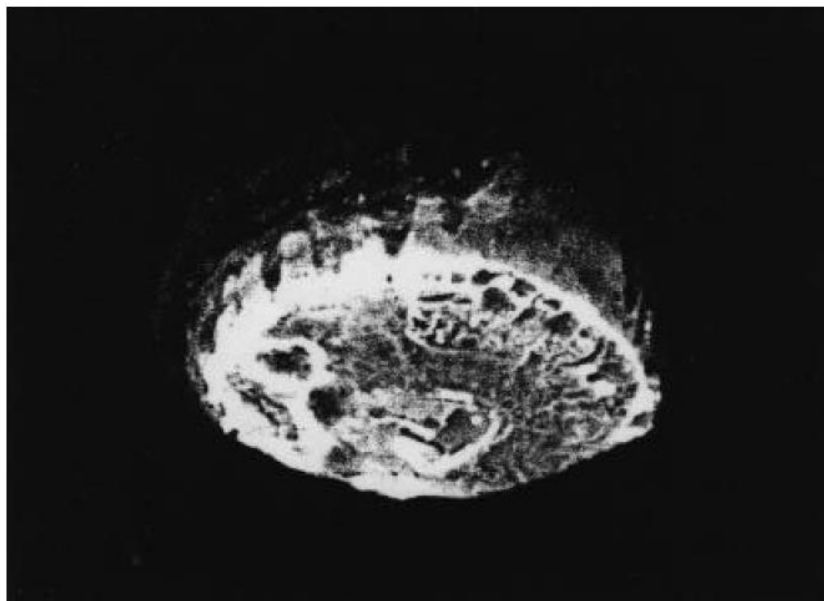
*Tab. 11* vypovídá o minimálním vlivu metody LBI na obsah dusíku v tavenině. Pokud se použije dusík jako ochranná atmosféra, použití argonu pak zaručuje minimální nebo žádný průnik dusíku do taveniny. Poměrem těchto dvou složek se hledá vhodná varianta, která zajistí stejný nebo nižší obsah dusíku. Další snižování obsahu dusíku v tavenině by bylo možné úplným nahrazením dusíku argonem.

Výrazné snížení obsahu vodíku je zaznamenáno v *Tab. 12*. Důvodem je zamezení kontaktu taveniny se vzdušnou vlhkostí, ze které by za určitých podmínek docházelo k výraznému pohlcování vodíku. Celková redukce obsahu vodíku činí při použití LBI pro různé materiály 40 až 75 % oproti atmosférickému tavení. Tento efekt vede ke zlepšení kvality odlitku především vlivem redukce porezity. [22]

#### *Tvorba strusky (oxidace kovu)*

Mezi další přednosti LBI patří také snížení reoxidace samotné taveniny. Během běžného tavení na vzduchu dochází ke tvorbě strusky na hladině taveniny oxidací různých prvků obsažených v kovu v kombinaci s pecní vyzdívkou. Přestože se většina strusky z hladiny odstraní, část se jí přenesení do odlitku. Přechod strusky do odlitku vede ke snižování jeho kvality. Navíc se struska zachycuje na stěnách pece a pánve, čímž snižuje jejich životnost a zvyšuje náklady na údržbu.

Na *Obr. 25 a Obr. 26* je porovnání dvou hladin taveniny při a bez použití LBI. Na *Obr. 25* je vidět poměrně silná vrstva strusky oproti *Obr. 26*, kde se struska také tvoří, ovšem v poměrně velmi redukované míře, a to o 50 až 70 % méně. Atmosférické tavení vyžaduje zhruba (5 až 6) krát odstranění strusky, oproti tavení s použitím inertní atmosféry, kdy bylo potřeba odstranit strusku (1 až 3) krát. [22]



**Obr. 25: Tvorba strusky na hladině při tavení bez použití LBI [22]**



**Obr. 26: Poměrně čistá tavenina při tavení s použitím LBI [22]**

#### *Oxidace taveniny*

Vzorky odebírané z několika různých druhů natavených ocelí potvrdily větší obsah chromitých a manganatých oxidů v tavnách na volné atmosféře. *Tab. 13* vyjadřuje procentuální redukci různých oxidů obsažených ve strusce o 50 až 80 % při použití LBI. Oxidy chromu a manganu se tvoří oxidací těchto prvků v tavenině, což vede ke snižování jejich obsahu. LBI nejenom, že snižuje obsah oxidů chromu a manganu ve strusce, ale zároveň snižuje i množství strusky, jak bylo uvedeno výše. Tím se výrazně snižují ztráty Cr a Mn v tavenině. [22]

Tab. 13: Zastoupení jednotlivých oxidů ve strusce [22]

Zastoupení oxidů ve strusce [%]				
Slitina	Oxid	Tavení s použitím LBI	Tavení bez LBI	Snížení oxidů ve strusce [%]
CF-8M	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	20	65,0
	MnO	5	13	61,5
CK-20	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	18	66,7
	MnO	2	9	77,8
8620	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	2,7	74,1
	MnO	13	27	51,0
	FeO	1,6	8,4	81,0
4140	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	1,4	78,6
	MnO	3,5	17	79,4
	FeO	0,6	4,9	87,8

#### *Pecní vyzdívka*

V experimentu byla použita slinutá pecní vyzdívka na bázi MgO. Eroze vyzdívky se výrazně snížila při použití metody LBI, zejména díky snížení množství strusky a snížení obsahů oxidů železa, manganu a chromu ve strusce. Tím se také snížilo množství strusky a kovu ulpěného na stěnách pece a pánve, čímž se snížila potřeba údržby. Po 50 tavných vykazovala pecní vyzdívka minimální erozi, zatímco v případě tavení ve volné atmosféře se prováděly opravy po každých 10 až 15 tavných. Přestože nebyl proveden dostatek taveb vedoucích k jistému závěru o dopadu metody LBI na životnost pecní vyzdívky, lze na základě pozorování odhadnout její pozitivní vliv. [22]

#### *Kvalita odlitků*

Dle očekávání se díky metodě LBI značně zlepšila povrchová kvalita odlitků. Příčinou bylo snížení obsahu kyslíku a vodíku spolu se snížením tvorby strusky a reoxidací taveniny. Tavení pod inertní atmosférou vede především k výrazné redukci porezity a struskových vměstků. [22]

#### *Bezpečnost*

Z důvodu použití poměrně velkého množství proudících inertních plynů, byl kladen důraz na bezpečnost práce. Podstata spočívala v monitorování obsahu kyslíku v okolí pece. Výsledky ukázaly jeho běžné množství a není tedy důvod žádných speciálních bezpečnostních opatření. Nedostatek kyslíku způsobený inertními plyny se projevuje maximálně do výšky 90 až 120 cm nad pecí. [22]

## 2.6 Metoda ochrany taveniny s použitím tekutého argonu

Následující text porovnává výhody aplikace patentované metody SPAL<sup>TM</sup> od společnosti Air Liquide U.S. LP ve firmě Quality Castings, LLC při indukčním tavení železných a neželezných slitin. [23]

Existují různé možnosti, jak lze chránit taveninu před oxidací a vlhkostí pomocí inertních plynů, od ručně vyrobených a složených zařízení po složité standardizované systémy využívající speciální součásti.

Důvodem vývoje této technologie byl požadavek firmy Quality Castings přejít z ochrany tekutým argonem, pomocí jimi sestaveným zařízením, na profesionálnější, nepřetržitý, více efektivní ochranný systém povrchu taveniny inertním plynem, s ohledem na jednoduchost a odolnost zařízení a zvýšení kvality odlitků.

Při porovnání s předcházejícím zařízením je použití SPAL<sup>TM</sup> technologie méně komplikované, umožňuje neměnný přísun kryogenního proudu argonu a je uživatelsky příznivější pro slévače. Argon minimalizuje množství kyslíku a vzdušné vlhkosti nad taveninou. [23]

Hlavní přínosy této technologie:

- Omezení reakce mezi taveninou a pecní vyzdívkou snižuje pravděpodobnost tvorby strusky. Redukce tvorby strusky znamená snížení času tavení materiálu. Legury jsou rychle pohlcovány taveninou a teploty tavení se mohou snížit.
- Menší obsah rozpuštěného kyslíku v tavenině umožňuje její lepší slévatelnost, zlepšuje se zabíhavost a tím také plnění formy. To vede k nižšímu počtu zmetků způsobených především porezitou, vměstky nebo nezaběhnutím materiálu do celé formy.
- Zmetkovitost a opravy se snižují tedy zejména menším počtem kusů, které jsou nezaběhnuté, mají zavaleniny, porezitu nebo vměstky vznikající z pecní vyzdívky a oxidací během míchání taveniny.
- Došlo také ke zvýšení životnosti pecní vyzdívky a to až na třinásovek její běžné životnosti.
- Odstranění keramiky, odřezávání a broušení odlitků je jednodušší.
- Úspora při použití zkapalněného argonu.

[23]

Na základě velkého množství vyzmetkovaných odlitků, se v roce 2007 Quality Castings rozhodli navrhnout zařízení, které rozptylovalo argon (kombinace kapalná a plynná fáze) na hladinu roztaveného materiálu. Tento systém výrazně pomohl zvýšit kvalitu produktů, životnost kelímku a také snížil počty oprav. Nicméně v průběhu času bylo potřeba snížit náklady na argon. Po konzultaci s různými dodavateli se rozhodli pro společnost Air Liquide, která poskytla svoje zkušenosti a nabídla svoji technologii SPAL™. V květnu 2010 se provedl v QC průzkum s cílem určit velikost úspory a zvýšení kvality odlitků. [23]

### 2.6.1 Experiment

Technologie SPAL™ byla testována v Quality Castings [23] v indukční peci s kapacitou kolem 135 kg na korozivzdorných ocelích 316 a 15-5. Zařízení zahrnuje trvale instalovaný zásobník s kryogenním argonem s přívodním opláštěným potrubním systémem. Specialisté z Air Liquide zhodnotili velikost pece a určili přesný průtok argonu.

Při dopadu na hladinu taveniny nebo těsně nad ní se tekutý argon začne odpařovat a zvětší tak svůj objem 840 krát. Plynný argon je těžší než okolní vzduch a proto tvoří bariéru mezi taveninou a okolím. [23]

### 2.6.2 Výsledky

Cílem experimentu ve firmě Quality Castings, LLC bylo porovnat kvalitu a náklady pro zařízení zkonstruované slévárnou a patentovanou technologií SPAL™ od společnosti Air Liquide U.S. LP. Po zavedení používání ochranné argonové atmosféry v QC se v roce 2008 dvojnásobně zvýšila životnost kelímku, nutné opravy na svařovně se snížily na 50 % a trojnásobně se zvýšilo použití vratu.

Odborníci z Air Liquide zjistili, že v případě předešlého zařízení se zhruba 50 % argonu ztratilo během zásobování a transportu do pece. Přísun argonu do pece nebyl dostatečný a konstantní, tudíž nebylo dosaženo všech výhod, které tekutý argon poskytuje.

Technologie SPAL™ zvýšila životnost kelímku o dalších 30 % (životnost byla pravděpodobně navýšena z důvodu možnosti snížení teploty v peci vyplývající ze zvýšení zabíhavosti taveniny) a snížila množství použitého dezoxidovadla SiTi o 55 %. Mimo jiné dělníci zaznamenali výrazně jednodušší vytloukání odlitků z keramických forem a snadnější odřezávání a broušení odlitků. Čistota odlitků pomohla snížit opravy na svařovně o dalších 25 %. Velmi pozitivní reakce přišla ze strany obráběcí firmy, kam se odlitky posílají na opracování, se závěrem, že životnost obráběcích nástrojů se zvýšila 10 krát.

Taviči okamžitě při první tavbě s použitím SPAL™ zpozorovali světlejší a čistší taveninu, způsobenou výrazným snížením tvorby strusky. Příčinou byl proud argonu nekolísavého charakteru, který byl schopen krýt taveninu konstantně. Nový způsob uchovávání argonu a jeho přívodu do pece ušetřil slévárně Quality Castings 5 000 \$ měsíčně.

Potenciál SPAL™ technologie tkví dále v možné snížení teploty tavení a lití, které povede k dalšímu zvýšení kvality odlitků, zejména jeho povrchu. Příkladem je jeden produkt v podobě trubky z korozivzdorné oceli AISI 304, která nebyla nikdy po obrobení v oblasti jejího ústí dokonale čistá. Při změně parametrů, konkrétně snížení teploty taveniny o 65 °C a snížení doby tavení o 10 %, se dosáhlo eliminování porezity a získala se požadovaná rozměrová stabilita. [23]

**Tab. 14: Výsledky experimentu provedeného ve slévárně Quality Castings, LLC. [23]**

Položka	Zařízení zkonstruované slévárnou	SPAL™
(Snížení množství materiálu vázaného do strusky)/tavbu	2 %	4 %
Zvýšení životnosti kelímku (Silica)	100 %	160 %
Množství dezoxidovadla SiTi	255 g	113 g (redukce o 55 %)
Snížení oprav na svařovně	50 %	75 %
Snížení teploty taveniny (AISI 304)	-	65 °C
Snížení doby tavení	-	10%
Zvýšení životnosti řezných kotoučů a brusných pásů	20 %	40 %
Zvýšení životnosti obráběcího nástroje	-	10 x

### 2.6.3 Závěr

Čistá tavenina zaručená SPAL™ technologií prokázala v porovnání se zařízením, které bylo navrženo a používáno slévárnou Quality Castings, LLC., výrazné snížení všech nákladů na výrobu přesných odlitků z železných i neželezných kovů. Tyto úspory se zajistily zejména snížením množství materiálu vázaného ve strusce, snížením oprav povrchu odlitků na svařovně, zvýšením efektivnosti zařízení zejména s ohledem na uskladnění a přívodu argonu do pece, snížením zmetkovitosti, snížením množství používaného dezoxidovadla, zvýšením životnosti pecního kelímku a snížením doby tavení i lití. [23]

## 2.7 Klasifikace vad přesných odlitků

Vady přesných odlitků se dělí na dvě skupiny. Zjevné vady lze detekovat vizuálně pouhým okem nebo jednoduchými pomocnými prostředky jako je lupa nebo různá měřidla. Druhou skupinou jsou vady skryté, které se zjistí po obrobení, vhodnými přístroji nebo laboratorními zkouškami. Na rozhodující parametry, jako je tolerance rozměrů, jakost povrchu, vnitřní kvalita, dodržení všech fyzikálních a mechanických vlastností, se kladou velké nároky. Z toho důvodu je celý výrobní proces velmi náročný. [24,25,26]

Zmetky mohou vznikat v jednotlivých fázích výroby:

- Výroba vytavitelných modelů je základem k dodržení rozměrových tolerancí přesných odlitků.
- O kvalitě odlitků také z velké části rozhoduje správný vtokový systém. Poloha modelů na stromečku a průměry vtokových a rozváděcích kanálů mají podstatný vliv na vnitřní čistotu odlitků, vznik staženin, pórovitosti, trhlin, strusky a nekovových vměstků.
- Důležitá je také kontrola vstupních surovin používaných při výrobě keramické formy.
- Během tavení a lití se musí přesně kontrolovat teploty kovů a formy, provádět tavbu správným způsobem i její metalurgické zpracování. Tato výrobní fáze rozhoduje o povrchové kvalitě odlitků, o jejich vnitřní čistotě a mechanických vlastnostech.

[24]

Následující přehled zahrnuje nejčastěji se vyskytující vady rozdělené do dvou skupin. V první skupině jsou vady, které vznikají nedodržováním podmínek správné formovací techniky, a do druhé skupiny se řadí vady vznikající při lití. Chybí zde vady, k jejichž zjištění je zapotřebí laboratorních zařízení, a dále vady, jejichž příčinou jsou vadné modely, nebo jejich nesprávně sestavené stromečky. Tento druh vad by se v provozu ani neměl vyskytovat, neboť při kontrole jednotlivých výrobních úseků se vadné modely nepošlou dále do výroby. Tento přehled sleduje normu ČSN 42 1240 pro odlitky lité do pískových forem. Vady vymykající se této normě jsou uvedeny zvlášť. [24,25,26]



### 2.7.1 Nezaběhnutí (číslo skupiny vad: 1)

*Skupinové označení vady:* Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti

*Popis:* Nedostatečným vyplněním formy nedojde k úplnému vytvoření tvaru odlitku.

*Příčiny vzniku:*

- Prodyšnost skořepiny – vlivem její nízké prodyšnosti brání vzduch uzavřený v tenkých průřezích a rozích úplnému vyplnění formy kovem. Příčinou může být nedokonale vyžíhaná skořepina, příliš jemná žárovzdorná moučka v obalové hmotě, nevhodná viskozita obalové hmoty nebo nevhodná zrnitost posypového materiálu.
- Teplota lití – při nízké teplotě kovu dojde k jeho předčasnému ztuhnutí.
- Nevhodný vtokový systém – vlivem rychlejšího ochlazení kovu způsobeného vyplňováním nízkou rychlostí.
- Vsázka – materiál nemá pro daný odlitek dostatečnou slévatelnost.
- Tvar – nedodržení správného poměru tloušťky stěny vzhledem k velikosti plochy.

*Odstranění vady:*

- Prodloužení doby vypalování formy, kontrolovat zrnitost žárovzdorné moučky a posypu, kontrolovat zároveň viskozitu obalové hmoty.
- Zvýšit teplotu kovu při lití, a pokud je to možné, zvýšit teplotu formy.
- Optimalizovat vtokovou soustavu s ohledem na plnění formy.
- Použít jiný materiál s lepší slévatelností.
- Tloušťky stěn odlitku je nutné konstrukčně upravit dle zásad technologičnosti konstrukce odlitku pro přesné lití.

### 2.7.2 Vyboulení (číslo skupiny vad: 1)

*Popis:* Nepravidelné místní deformace povrchu odlitku

*Příčiny vzniku:*

- Povrch voskových modelů – nebyl zbaven mastného dělicího prostředku.
- Nevysušené keramické obaly – zejména první obal, ale i ostatní nejsou zcela suché. Tím dojde k vyboulení obalů.
- Nízká žárovzdornost obalu – skořepina se vyboulí vlivem působení hydrostatického tlaku kovu na částečně zplastizovanou skořepinu.

*Odstranění vady:*

- Důkladné odmaštění voskových modelů.
- Zejména v případě prvního obalu prodloužit dobu sušení.
- Změnit žárovzdorný materiál v obalové hmotě, nebo zvýšit počet obalů skořepiny.

### **2.7.3 Připečeniny (číslo skupiny vad: 2)**

*Skupinové označení vady:* Vady povrchu.

*Popis:* Drsný a hrubý povrch odlitku vzniklý spečením formovací hmoty s povrchem odlitku.

*Příčiny vzniku:*

- Oxidy prvků kovu – struskovitý produkt reakce, který má obvykle nižší teplotu tavení než skořepina, se připeče na povrchu odlitku.

*Odstranění vady:*

- Změnit žárovzdorný materiál v obalové hmotě jiným, který nereaguje s oxidy kovů. Například korund, zirkon místo křemenné moučky.

### **2.7.4 Zavaleniny (číslo skupiny vad: 2)**

*Skupinové označení vady:* Vady povrchu.

*Popis:* Rýhy nebo prohlubeniny se zaoblenými okraji na povrchu nebo procházející celou stěnu odlitku.

*Příčiny vzniku:*

- Přerušené lití – první část vlitého kovu již na povrchu stačila zoxidovat a zbytek se nedokázal dokonale napojit.
- Nízká teplota lití – nedošlo k úplnému spojení dvou proudů kovu ve více vzdálené oblasti od vtoku.
- Nevhodný vtokový systém – z důvodu jeho nesprávné konstrukce se forma neplní optimálně, kov ztrácí teplotu a nedojde k propojení dvou proudů kovu.
- Nízká teplota formy – důsledkem je rychlejší ochlazování tekutého kovu.

*Odstranění vady:*

- Zajištění rychlejšího a plynulejšího plnění formy.
- Zvýšení teploty lití.
- Upravit konstrukci vtokového systému.
- Zvýšit teplotu formy.

### **2.7.5 Zálupy (číslo skupiny vad: 2)**

*Skupinové označení vady:* Vady povrchu.

*Popis:* Mělké užší nebo rozlehlejší prohlubeniny na povrchu odlitku, které jsou zakryté šupinou kovu spojenou s odlitkem, od něhož je jinak oddělena vrstvičkou keramického materiálu.

*Příčiny vzniku:*

- Nesprávný postup během obalování – jednotlivé obaly spolu nejsou dostatečně spojeny. Při vytavování vosku nebo při lití dojde k uvolnění obalů a vniknutí kovu do mezery.
- Příliš jemný posypový materiál – nezaručuje soudržnost mezi obaly.
- Rozdílný koeficient tepelné roztažnosti žárovzdorné moučky v obalové hmotě a posypového materiálu – forma popraská při ohřevu skořepiny.
- Velikost odlitku – pokud je velmi rozměrný a těžký, je třeba použít více keramických vrstev. Vnitřní vrstva se zahřeje a roztáhne, ale vnější vrstva se kvůli nízké tepelné vodivosti křemene nedeformuje v takovém rozsahu. Tím dochází ke vzniku napětí a následnému posunutí a oddělení vrstev.

*Odstranění vady:*

- Stromeček musí v obalové hmotě setrvat dostatečnou dobu, aby se smočil a nezůstávali v obalu vzduchové bubliny.
- Použít posypový materiál s hrubším zrnem.
- Použít stejný druh žárovzdorného posypového materiálu jako v obalové hmotě.
- Na velké odlitky je třeba použít materiál s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti.

### **2.7.6 Nárůstky - strupy (číslo skupiny vad: 2)**

*Skupinové označení vady:* Vady povrchu.

*Popis:* Na povrchu odlitku se tvoří útvary různého tvaru a velikosti. Tyto útvary jsou z kovu s vrstvičkami nebo vměstky formovacího materiálu.

*Příčiny vzniku:*

- Jemné trhlinky v primárním obalu – nepředepsaným vysušením vzniknou trhlinky. Během tvorby druhého obalu se dostane obalová hmota (především pojidlo) do primárního obalu. Tekutý kov se pak při lití protlačí do sítě trhlínek.
- Příliš hrubý posypový materiál – kov pronikne do stěny skořepiny.
- Reakce kovu s materiálem skořepiny – dochází k redukci žárovzdorného materiálu obalové hmoty nebo k tvorbě struskových sloučenin, které mají nižší teplotu tání než původní forma. Kov proniká do stěny skořepiny.

*Odstranění vady:*

- Zajištění stálosti teploty během sušení obalů.
- Sladit zrnitost posypového materiálu s hustotou obalové hmoty.
- Volba materiálu skořepinové formy se volí dle litého materiálu a podle toho, zda se lije za normálního, nebo sníženého tlaku.

### 2.7.7 Výronky (číslo skupiny vad: 2)

*Skupinové označení vady:* Vady povrchu.

*Popis:* Vystouplé žebrované nebo žilkovité výrostky na povrchu odlitku vzniklé zatečením kovu do trhlín v povrchu skořepiny v její dutině nebo otvoru.

*Příčiny vzniku:*

- Nesprávně vytavované voskové modely.
- Kolísání teploty během sušení jednotlivých obalů.
- Nízká pevnost skořepin – způsobená krátkou dobou namáčení suchých obalů, velkým amorfním podílem žárovzdorné moučky v obalové hmotě, nízkou vazností pojiva.

*Odstranění vady:*

- Během vytavování voskových modelů zajistit tepelný šok, který vytvoří dilatační spáru mezi modelem a skořepinou.
- Dodržet předepsané podmínky při sušení.

- Prodloužit dobu ponoru stromečku do obalové hmoty, použít vyhovující žárovzdornou moučku a zkontrolovat vlastnosti pojidla.

### 2.7.8 Trhliny (číslo skupiny vad: 3)

*Skupinové označení vady:* Přerušení souvislosti.

*Popis:* Roztržení nebo natržení stěny odlitku, které vzniklo při vyšších teplotách. Povrch trhlin je nerovný, často okysličený. Trhliny probíhají po hranicích zrn.

*Příčiny vzniku:*

- Chemické složení litého kovu – má široký interval tuhnutí, a tím sklon k tvorbě trhlin za tepla.
- Tvar odlitku – pokud má odlitek rozdílné tloušťky stěn a přechody mezi nimi ostré.
- Příliš pevná skořepinová forma – nedovolí odlitku smrštění.
- Nevhodná teplota kovu při lití.
- Nesprávné metalurgické zpracování oceli.

*Odstranění vady:*

- Použití vhodnějšího materiálu s jiným chemickým složením.
- Upravit konstrukci odlitku.
- Snížit pevnost skořepiny redukcí obalů.
- Vhodná úprava lící teploty.
- Na základě chemického složení materiálu navrhnout správné metalurgické zpracování.

### 2.7.9 Praskliny (číslo skupiny vad: 3)

*Skupinové označení vady:* Přerušení souvislosti.

*Popis:* Roztržení odlitku vzniklé při nízkých teplotách. Povrch praskliny je zrnitý, bez dendritů. Stěna praskliny je bez náběhových barev, pokud k prasknutí došlo až po vychladnutí. Jinak jsou její stěny slabě naběhlé.

*Příčiny vzniku:*

- Rozdílné tloušťky stěn odlitků.
- Nerovnoměrná tloušťka skořepinové formy – prasknutí způsobí vyvolané pnutí, vzniklé během rozdílu v chladnutí jednotlivých částí odlitku.

- Vtoková soustava – nevyhovuje tvaru odlitku a způsobuje opět nerovnoměrné chlazení kovu.
- Vysoké smrštění litého kovu.

*Odstranění vady:*

- Konstruktivní úprava odlitku.
- Zaručit stejnou tloušťku jednotlivých obalů keramických forem.
- Upravit vhodně vtokovou soustavu.
- Použít slitinu s menším smrštěním.

### **2.7.10 Bodliny (číslo skupiny vad: 4)**

*Skupinové označení vady:* Dutiny.

*Popis:* Malé dutiny s hladkým povrchem těsně pod povrchem odlitku, ústící na povrch malými otvory.

*Příčiny vzniku:*

- Způsob tavení – přijde-li kov do styku s vodou nebo vodní párou.
- Nedostatečně dezoxidovaný kov.
- Nevhodný způsob lití.

*Odstranění vady:*

- Vsázka, licí žlábek a všechny nástroje musí být vysušené.
- Správně a dostatečně dezoxidovat.

### **2.7.11 Staženiny (číslo skupiny vad: 4)**

*Skupinové označení vady:* Dutiny.

*Popis:* Otevřené nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitku s drsným nebo hrubě krystalickým, oxidovaným povrchem. Někdy se staženina projeví jako propadlina na povrchu.

*Příčiny vzniku:*

- Konstrukce odlitku – náhlými přechody v tloušťkách stěn se zabrání dosažení usměrněného tuhnutí.

- Nesprávně navržený vtokový a nálitkový systém – nezajistilo se usměrněné tuhnutí ve všech průřezích směrem k nálitku.
- Vysoká licí teplota.
- Místně popraskaná forma – pokud část kovu vytekla, nebyl v nálitku dostatek kovu k doplnění odlitku.

*Odstranění vady:*

- Upravit technologičnost konstrukce odlitku.
- Upravit vtokovou soustavu tak, aby bylo zajištěno usměrněné tuhnutí.
- Snížit teplotu lití, popřípadě snížit teplotu formy.
- Kontrola skořepinových forem a vyřazení zmetků.

### **2.7.12 Struskovitost (číslo skupiny vad: 5)**

*Skupinové označení vady:* Vměstky.

*Popis:* Otevřené nebo uzavřené vnitřní dutiny ve stěně odlitku úplně nebo z části zaplněné struskou.

*Příčiny vzniku:*

- Nedostatečně očištěná hladina kovu v pánvi.
- Zbytky strusky v pánvi z předchozí tavby.
- Nevhodná pecní vyzdívka, která se odtavuje tekutým kovem.
- Snížená kvalita materiálů na přípravu keramických forem.
- Nevhodný druh žárovzdorného materiálu k výrobě skořepinové formy, který reaguje s kovem.

*Odstranění vady:*

- Lépe čistit hladinu kovu v pánvi, například použít pánve se sifony a hradítky.
- Dokonale očistit pánev ihned po odlití od zbytků strusky a kovu.
- Volit jiný materiál na vyzdívku pece.
- Zlepšit vstupní a mezioperační kontrolu.
- Zvolit takový materiál pro výrobu skořepinové formy, který nereaguje se slitinou.

### 2.7.13 Zadrobeniny (číslo skupiny vad: 5)

*Skupinové označení vady:* Vměstky.

*Popis:* Otevřené nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitku zcela nebo částečně vyplněné materiálem skořepiny.

*Příčiny vzniku:*

- Příliš jemný posypový materiál – ve skořepinách se vyskytují trhlinky a proud kovu je částečně vydrobuje.
- Mastný povrch voskových modelů – první obal nepřilne k povrchu, vzniklým prnutím během sušení skořepina popraská a kov ji zanesse do různých částí odlitku.
- Krátká doba ponoření stromečku do obalové hmoty – špatná soudržnost obalů.
- Viskozita obalové hmoty je vysoká a posyp příliš jemný – labilní spojení jednotlivých obalů.
- Pojidlo v obalové hmotě nemá dostatečnou vazkost – nízká pevnost skořepin.
- Použití staré vazné kapaliny na přípravu obalové hmoty.
- Doba sušení jednotlivých obalů byla krátká.
- Kolísání teploty během sušení obalů.
- Nevhodné podmínky při vytavování modelového vosku.
- Nevyhovuje tepelný režim vypalování skořepin.
- Úlomky okrajů formy se dostaly dovnitř skořepiny.

*Odstranění vady:*

- Upravit zrnitost žárovzdorné moučky i posypu.
- Odmastit voskové modely.
- Delší doba ponoru stromečku do obalové hmoty.
- Upravit viskozitu obalové hmoty a zrnitost posypu.
- Nahradit nevhodnou obalovou hmotu.
- Prodloužit dobu sušení skořepin.
- Zabránit kolísání teploty v sušicím prostoru.
- Rovnoměrně prohřívání skořepin při jejich žhání.
- Zabránit napadání úlomků vtoku do skořepiny.



### 2.7.14 Broky (číslo skupiny vad: 5)

*Skupinové označení vady:* Vměstky.

*Popis:* Malé okysličené kovové kuličky v otevřených bublinách, které ztuhnou nezávisle na odlitku.

*Příčiny vzniku:*

- Nesprávné plnění formy kovem – vlivem rychlého plnění formy dochází k rozstříku kovu, kapky se zachytí na stěnách formy, ztuhnou a zoxidují. Reakcí oxidů na jejich povrchu s uhlíkem vlévaného kovu vzniknou v okolí vměstku bubliny CO.

*Odstranění vady:*

- Upravit vtokovou soustavu, aby plnění bylo plynulé a kov se nerozstříkoval.

### 2.7.15 Často se vyskytující vady u přesných odlitků, jež nejsou součástí ČSN 42 1240

*Popis vady:* Odlitky mají v koutech, ostrých rozích a otvorech kulové přilítky pevně spojené s povrchem odlitku.

*Příčiny vzniku:*

- Hustá obalová hmota pro primární obal – svojí vysokou hustotou uzavře obalová hmota na povrchu voskového modelu vzduch a vytvoří bubliny. Tekutý kov se při lití dostává do připravených otvorů.
- Mastné voskové modely – nedokonalým odmaštěním voskových stromečků od minerálních nebo silikonových olejů obalová hmota nesmočí dokonale povrch vosku a vznikají opět vzduchové polštářky.
- Obalová hmota obsahuje vzduch.

*Odstranění vady:*

- Upravit viskozitu obalové hmoty dle předpisu.
- Dokonale odmastit povrch voskového modelu.
- Ponechat čerstvě připravenou obalovou hmotu určitou dobu v klidu.

*Popis vady: Nedosažení předepsané drsnosti přesného odlitku*

*Příčiny vzniku:*

- Příliš hrubý posypový materiál – vzhledem k viskozitě obalové hmoty prvního obalu pronikne posyp až k povrchu modelu. Odlitek pak kopíruje zdrsňený reliéf skořepiny.
- Síť trhlinek v primárním obalu.

*Odstranění vady:*

- Upravit zrnitost posypového materiálu.
- Překontrolovat fáze výrobního procesu skořepin, kdy mohou vznikat trhlinky a přehodnotit jejich dosavadní postup.

*Popis vady: Povrchové oduhličení přesného odlitku*

*Příčiny vzniku:*

- Oxidace uhlíku v povrchové vrstvě chladnoucího odlitku. Hloubka oduhličení závisí na obsahu uhlíku v oceli.

*Odstranění vady:*

- Nahradit uhlíkatou ocel ocelí legovanou.
- Odlévat a nechat chladnout odlitky ve vakuu, nebo v atmosféře bez kyslíku.
- Zasypat skořepiny před litím keramickým materiálem, které vlivem tepla vytvářejí redukční prostředí.
- Odlévat do chladnějších nebo studených forem.
- Dodatečně odlitky nauhličit.

[24,25,26]

### **2.7.16 Vměstky**

Předchozí přehled vad sledoval normu ČSN 42 1240 a jednalo se o klasifikaci jednotlivých vad. V této práci je třeba rozebrat vměstky ve slitinách důkladněji a zároveň popsat specifický příklad vměstku – oxidickou blánu.

Vměstky mohou být nekovové nebo intermetalické fáze obsažené v matici kovu. Vznikají během vlastního výrobního procesu a jsou jeho neoddělitelnou součástí. V železných

slitinách se vyskytují jako sloučeniny kyslíku, síry, dusíku nebo jejich kombinací. Zhoršují proces lití, kdy mohou bránit dobrému zaplnění formy nebo úniku plynů. Pokud vměstky zmenšují nosný průřez odlitku, působí jako koncentrátory napětí a zhoršují prakticky všechny jeho vlastnosti. Pokud průřez výrazným způsobem nezmenšují, neovlivňují pevnostní charakteristiky, ale mají dopad na plastické vlastnosti. U ocelí v případě tlustostěnných odlitků zvyšují sklon ke vzniku trhlin a praskání. Největší vliv mají ale na součásti pracující za vysokých teplot, kde se projevuje poměrně značné kolísání mechanických vlastností odlitku. Vměstky můžeme dělit dle původu vzniku na exogenní a endogenní.

Exogenní vměstky vznikají za působení vnějších vlivů. Jedná se o strusku, pěnu (tuhé oxidy), úlomky formovacího materiálu, nátěrů nebo vyzdívek, zbytky tavidel nebo produkty různých chemických reakcí mezi vyzdívkou, atmosférou nebo formou. Ve většině případů bývají makroskopické, tedy okem spatřitelné, a mají tendenci se vyskytovat v určitých oblastech, například u vtoku.

Naopak endogenní vměstky jsou vázány ve slitině již od jeho hutní výroby. Vznikají však také během zpracování taveniny nebo precipitací při změnách rozpustnosti jednotlivých složek slitiny při chladnutí. Tento typ vměstků jsou především malé částice okolo 1  $\mu\text{m}$ , ale mohou být i větší. Bývají rozmístěny rovnoměrně ve struktuře, koncentrovány na hranicích zrn nebo uvnitř zrn. Výskyt endogenních vměstků ovlivňuje: [16,27]

- Původ a čistota výchozího materiálu
- Reakce složek slitiny s prostředím během tavení, transportu taveniny a plnění forem
- Znečištění taveniny produkty metalurgických pochodů (dezoxidace)
- Reakce taveniny s vyzdívkami a formou

Vměstky lze také rozdělit na mikrovměstky a makrovměstky.

Mikrovměstky jsou přirozené vměstky, které vznikají reakcí mezi přítomnými legujícími prvky slitiny a kyslíkem. Nelze je z taveniny úplně odstranit, ale lze je alespoň částečně eliminovat. [27]

Vznik a přítomnost makrovmešků je spojen s desoxidací/reoxidací, zahlcenou struskou a erozí žáruvzdorných materiálů během odlévání taveniny. Jsou definovány svojí velikostí a chemickým složením. Díky tomu lze určit jejich původ a postupy eliminace. Lze odstranit

vměstky o velikosti 50 až 100  $\mu\text{m}$  a větší, ovšem menší vměstky a mikrovměstky mohou být problémem. [27]

Rozhodujícím faktorem ovlivňující vyplouvání vměstků do strusky je velikost vměstků. Velké částice vyplouvají rychleji, a proto se činí opatření podporující spojování drobných vměstků. U ocelí se doporučuje dezoxidovat kombinací Mn : Si = 4 : 1. [16]

#### *Oxidické pleny*

Oxidické pleny jsou specifické typy oxidických vměstků, jejichž tvar je plošný a tenký. Jsou většinou spojitě ve formě blan a způsobují tak lokalizovanou nespojitost odlitku. Jejich členitý tvar se slabou vazbou na okolní kov působí nepříznivě a můžeme ho přirovnat k působení grafitu u litin s lupínkovým grafitem. Méně škodlivé jsou drobené, okrouhlé, tvárné a rovnoměrně rozložené vměstky. Pleny vznikají na volném povrchu taveniny a vlivem turbulentního proudění tekutého kovu během odlévání do formy se rozmístí po celém objemu odlitku. Za určitých okolností mohou reagovat s materiálem formy a ulpívat tak na stěnách a jádrech formy, kde zhorší povrchovou, ale i vnitřní jakost odlitku. Vlivem vysoké viskozity a převládajícímu plošnému rozměru vytvářejí často rozsáhlé shluky na povrchu i uvnitř odlitku. [25]

## 3 Kovové materiály pro speciální aplikace

Jak jsem již v úvodu předestřel, následující přehled materiálů je velmi obecný. Speciální aplikace jsem pojal jako výrobky pro energetický, letecký nebo kosmický průmysl. Materiálů, které se v celosvětovém měřítku používají je nesčítelně, proto následující přehled je pouze informativní výběr těch nejpoužívanějších. Kapitulu jsem rozdělil na tři úseky, první podkapitolou jsou žárovevné materiály, pak slitiny lehkých kovů a v posledním bodě jsem popsal tři druhy materiálů odlévaných ve slévárně Prague Casting Services a.s.

### 3.1 Žárovevné materiály

Žárovevné materiály jsou schopné čelit vysokým teplotám, musejí být odolné proti creepu, relaxaci a splňovat i další požadavky. Hlavním důvodem schopnosti kovových materiálů pracovat až do teploty  $0,75 T_t$  je jejich precipitační nebo disperzní zpevnění. [28,29]

Obecně lze creep (tečení materiálu) popsat jako deformaci materiálu, která je časově a teplotně závislá a je způsobená napětím menším než je mez kluzu. Dle teploty se creep dělí na nízkoteplotní ( $T < 0,3 T_t$ ), vysokoteplotní ( $T \approx 0,3 \div 0,85 T_t$ ) a difúzní ( $T > 0,85 T_t$ ). Relaxace je jev, kdy vlivem zvýšené teploty a dlouhodobého namáhání materiálu při konstantní deformaci dochází k postupnému uvolňování energie napjatosti přechodem z deformace elastické na deformaci plastickou ( $\epsilon_c = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} = \text{konst}$ ). [28,30]



Obr. 27: Lopatky odlévané ze žárovevných ocelí [31]

#### 3.1.1 Feriticko-perlitické a bainitické oceli

Jakostní oceli UQ jsou tvářené a nelegované, jsou feriticko-perlitické a používají se pro tlakové nádoby a zařízení pracující za vyšších teplot. Lze několika způsoby upravovat jejich chemické složení. Až na výjimky mají nízký obsah uhlíku, zvýšený obsah manganu (max 1,7 %),

mikrolegovány jsou niobem (max 0,01 %), titanem (max 0,03 %) a vanadem (max 0,02 %). Tvářitelnost a svařitelnost zaručují úpravy, které vymezují obsah některých prvků (Cr + Cu + Mo + Ni) na max. 0,7 % a zaručují desoxidací obsah hliníku min. 0,02 %. Hliník vytváří disperzní nitridy, které u nízkouhlíkatých ocelí zabraňují zkřehnutí oceli (stárnutí při vyšších teplotách), zvyšuje odolnost proti koroznímu praskání, zmenšuje velikost austenitického zrna i sekundárního zrna oceli a způsobuje částečné precipitační zpevnění feritu.

Mimo legování feritu, zjemnění zrna a precipitačního zpevnění zvyšuje žárovevnost u nízkolegovaných jakostních ocelí LE také bainit, který vznikne při vhodně zvolené ochlazovací rychlosti rozpadem austenitu nebo sorbit vznikající zušlechťením.

Maximální pracovní teplota pro oceli P235GH a P265GH se pohybuje od 350 °C, pro plechy, po 425 °C pro výkovky a vylisky. Odlitky například z oceli GP240GH odpovídají tvářeným ocelím UQ a používají se do teplot od 400 do 450 °C.

Tvářené žárovevné oceli mají nízký obsah uhlíku (do 0,2 %) a jsou legovány chromem (max. 3 %), vanadem, molybdenem a wolframem (max. 1 %). Oceli na odlitky se od tvářených liší zvýšeným obsahem manganu a křemíku, které zaručí lepší slévateľnost. [28,32]

**Tab. 15: Vybrané nelegované a nízkolegované oceli pro vyšší teploty a oceli žárovevné [28]**

Označení oceli dle ČSN EN	Číselné označení	Druh	Stav
P235GH	1.0345	UQ	N
P265GH	1.0425	UQ	N
P295GH	1.0481	UQ	N
P355GH	1.0473	UQ	N
16Mo3	1.5415	LE	N, NT
13CrMo4-5	1.7335	LE	NT
10CrMo9-10	1.7380	LE	QA, QL
14MoV6-3	1.7715	LE	NT, QT

*(Poznámka: NT nebo QT – kombinace normalizačního žihání (920 až 980 °C) a popouštění za vysoké teploty (630 až 760 °C), QA, QL – Řízené zrychlené ochlazování z austenizační teploty)*

Zvláštní skupinu ocelí LE tvoří oceli odolné proti stlačenému vodíku využívané v petrochemickém průmyslu pro vysokotlaká zařízení. Představitelem této skupiny je například ocel 10CrMo9-10 schopna odolávat vodíku do 500 °C. [28,32]

### 3.1.2 Vysokopopuštěné martenzitické oceli

Žáropevnosti se u těchto materiálů dosahuje podobnými způsoby jako u feriticko-perlitických a bainitických ocelí. Větší obsah chromu zaručuje lepší odolnost proti oxidaci, popřípadě proti oduhličení v prostředích se stlačeným vodíkem. U vysokolegovaných ocelí dochází navíc ke zpevnění transformačnímu a precipitačnímu zpevnění Lavesovými fázemi.

Chemické složení vysokolegovaných žárovevných ocelí je modifikováno legurami Cr, Mo, V, W, Ti a Nb. Chrom je zastoupen v množství kolem 12 %, tedy tyto ocele jsou odvozeny od klasických korozivzdorných ocelí s nízkým obsahem uhlíku (do 0,2 %). Ostatní legury zajišťují tvorbu stabilnějších disperzních karbidů typu MC a M<sub>2</sub>C než jsou karbidy Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> a dále tvoří intermetalické Lavesovy fáze (Fe,Cr)<sub>2</sub> (Mo,W).

Mezi další důležité vlastnosti patří tlumení za provozních teplot, což zvyšuje jejich odolnost proti únavě, jsou vysoce prokalitelné, mají postačující obrobitelnost a za určitých podmínek také podmíněnou svařitelnost. [28,33]

**Tab. 16: Vybrané středně a vysocelegované žárovevné oceli [28]**

Označení ČSN EN	Chemické složení	Nejvyšší teplota [°C]	Použití
1.4718	X45CrSi9-3	650	Ventily spalovacích motorů
1.4882	X50CrMnNiNbN21-9	800	Výfukové ventily spalovacích motorů
1.4922	X20CrMoV11-1	625	Lopatky a rotory turbín
1.4931	GX23CrMoV12-1	670	Odlitky do tloušťky 60 mm
1.4941	XGCrNiTiB18-10	650	Přehřívákové trubky, součásti armatur, šrouby a matice
1.4919	X60CrNiMoB17-12-2	650	Přehřívákové trubky, součásti armatur
1.4959	X8NiCrAlTi32-21	750 (625)	Lopatky a rotory plynových turbín, (šrouby)
1.7366	X16CrMo5-1	550	Zařízení pro krakování ropy
1.7365	GX15CrMo5-1	550	Zařízení pro krakování ropy
1.4903	X10CrMoVNb9-1	600	Zařízení pro prostředí s H <sub>2</sub> S

### 3.1.3 Austenitické oceli

Výhoda austenitických ocelí spočívá v jejich kubické plošně středěné mřížce, kde jsou atomy v porovnání s kubickou tělesně středěnou mřížkou v těsnějším uspořádání, a tudíž u nich dochází k pomalejším difuzním dějům. Při creepu je proto pomalejší také zotavování a tím jsou austenitické oceli strukturně stabilnější. Vhodným legováním se zachovává zpevnění

legováním a precipitační zpevnění do vysokých teplot. Dosažením optimální velikosti zrna lze u austenitických ocelí ovlivnit také podíl pokluzů po hranicích zrn.

Odvozením od klasické chromniklové korozivzdorné oceli typu CrNi18-9 zvýšením obsahu niklu a příměsí titanu se zvýšila použitelnost materiálu typu CrNi18-10 až o 50 °C, tedy do teploty 650 °C. Dalšími typy žárovevných austenitických ocelí jsou CrNi16-13 nebo CrNi16-16 s vytvrzujícími přísadami Mo, Nb, Ti, W. S poměrně vysokým obsahem titanu a převažujícím množstvím niklu je jedním z vrcholových materiálů této skupiny X6NiCrTiMoVB25-15-2.

Charakteristikami austenitických žárovevných ocelí je jejich vysoká žárovevnost a odolnost proti oxidaci, nízká tepelná vodivost, vysoká tepelná roztažnost a obtížná obrobitelnost a svařitelnost. [28,34]

### 3.1.4 Slitiny Niklu a Kobaltu

Tyto slitiny se vyznačují ještě větší žárovevností než vytvrzené chromniklové austenitické oceli. Niklové slitiny jsou odolnější proti tečení materiálu (vyšší  $R_T$  a  $R_{mT}$ ), naopak kobaltové se vyznačují lepší tažností při tečení a odolností proti vysokoteplotní korozi ve spalinách. Zpevnění zajišťuje legování a precipitační zpevnění, a to u niklových slitin prostřednictvím intermetalických fází, u slitin kobaltu převážně karbidy. Mezi hlavní legury patří chrom (10 – 30 %) u obou druhů slitin, u kobaltových navíc nikl (10 – 20 %). Co, W, Mo, B a Zr se koncentrují na hranicích zrn a v důsledku zpomalení difúzních dějů zpomalují zotavení a vznik hrubých karbidů na hranicích zrn. Al a Ti tvoří vytvrzovací fáze. Mikrolegury jako jsou Hf, Ce nebo Y zvyšují žárovzdornost a ovlivňují povrchovou energii fázových rozhraní, čímž zvyšují dlouhodobou plasticitu slitiny. [28,35,57]

**Tab. 17: Vybrané žárovevné slitiny kobaltu a niklu [28]**

Značka slitiny	Obchodní označení
NiCo20Cr20Mo6Ti3Al	Nimonic 263
NiCr23Co12Mo9AlTi	Inconel 617
NiCr19Fe19Nb5Mo3TiAl	Inconel 718
CoCr20W15Ni10Fe3	Haynes L-605
NiCr14Co13Al5Ti4BZr	Nimonic 115
CoCr24Ni10Ta7W7FeTi	MAR-M509
NiCr20Al5Ti(Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Inco MA 956



Od určité doby provozu se upřednostňuje litá struktura na úkor tvářené, která obsahuje více přísad zvyšující žárovečnost. Vyrábí se například letecké motory s přesně litými lopatkami turbín nebo integrálně litými disky s lopatkami. [36]

### 3.1.5 Vysokotavitelné kovy a jejich slitiny

Do skupiny vysokotavitelných kovů se řadí chrom ( $T_T = 1875 \text{ °C}$ ), zirkonium ( $T_T = 1852 \text{ °C}$ ), vanad ( $T_T = 1902 \text{ °C}$ ) a další kovy, jejichž teplota tání je vyšší než  $2000 \text{ °C}$ , například wolfram, molybden, niob nebo rhenium s vysokou hustotou  $21\,000 \text{ kg.m}^{-3}$ . Velkým nedostatkem vysokotavitelných kovů je však jejich nízká žáruvzdornost, a proto je třeba na tyto materiály aplikovat ochranné povlaky. Například slitiny chromu se používají v úzkém intervalu  $900$  až  $1150 \text{ °C}$ , niob v rozmezí  $1100$  až  $1300 \text{ °C}$  a wolfram disperzně zpevněný  $2 \%$   $\text{ThO}_2$  je použitelný do  $2400 \text{ °C}$ .

Využití tyto prvky a jejich slitiny nacházejí v raketové technice, kosmonautice, jaderné a plazmové energetice nebo v elektrotechnickém průmyslu. Příkladem jsou trysky a spalovací motory. [28, 57]

## 3.2 Vybrané materiály odlévané v Prague Casting Services a.s.

### 3.2.1 CF3 (AISI 304L)

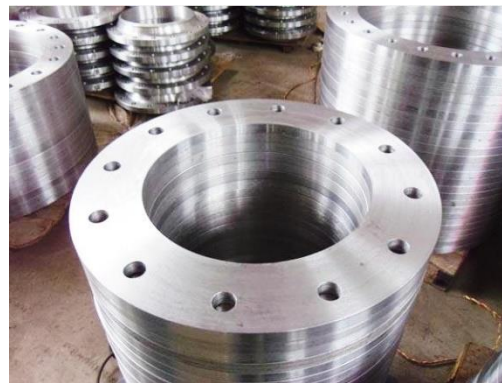
Materiál s označením AISI 304L je modifikací AISI 304 se sníženým obsahem uhlíku. Slitina s nižším obsahem uhlíku je odolnější vůči mezikrystalové korozi, a proto uplatnění nachází v aplikacích do  $350 \text{ °C}$ , kde základní jakost AISI 304 z pohledu antikorozi odolnosti nestačí. Vhodné bude porovnání AISI 304 a její nízkouhlíkaté modifikace. [37]

#### *Aplikace*

Obecně je AISI 304 nejpoužívanější korozivzdornou ocelí, která má nízký obsah uhlíku a to zaručuje její svařitelnost. Používá se hojně v chemickém, farmaceutickém, papírenském nebo potravinářském (mlékárenském, pivovarnickém) průmyslu. Mimo jiné se z ní vyrábí řada domácích zařízení, používá se ve zdravotnictví, architektuře a designu nebo automobilu. Lze ji použít do nízkých teplot ( $-196 \text{ °C}$ ). [37]



Obr. 28: Bazénové schůdky z AISI 304 [38]



Obr. 29: Příruba z AISI 304L [39]

### Chemické složení

Chemické složení materiálu CF3 v podstatě odpovídá chemickému složení materiálu s označením AISI 304L. Tato slitina železa se vyznačuje sníženým obsahem uhlíku oproti základní AISI 304, a to z 0,07 % až na maximální hodnotu 0,03 %. Důvodem je větší odolnost proti mezikrystalové korozi. [37]

Tab. 18: Chemické složení materiálu CF3 [40]

Prvek [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	Fe
Min	-	-	-	-	-	17,0	8,0	-	Bal.
Max	0,03	2,00	1,50	0,04	0,04	21,0	12,0	0,05	

(Poznámka: Bal. = Balance (základní složka slitiny))

### Korozní odolnost

Ocel je odolná vůči vodě, vodní páře nebo vzdušné vlhkosti, také vůči slabým organickým a anorganickým kyselinám a jedlým kyselinám. Odolává povětrnostním vlivům, ale už ne přímořským oblastem nebo podobným prostředím, kde se vyskytují agresivní chemické látky ve větší koncentraci. [37,41]

### Fyzikální vlastnosti

Slitina AISI 304 má austenitickou strukturu. Hustota se pohybuje kolem  $7\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a koeficient teplotní roztažnosti je  $16\cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ . Tepelná vodivost při  $20\text{ °C}$  odpovídá  $15\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . [37]

### Mechanické vlastnosti

Materiál AISI 304 má velmi dobrou tažnost za studena a lze ho plasticky zpevňovat.

Tab. 19: Mechanické vlastnosti materiálů AISI 304 a AISI 304L [37]

Slitina	Mechanické vlastnosti		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
AISI 304	min 230	540 - 750	min 45
AISI 304L	min 220	520 - 670	min 45

Tab. 20: Minimální mez kluzu materiálů AISI 304 a AISI 304L pro různé teploty [37]

	Slitina	Teplota [°C]								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
min $R_{p0,2}$ [MPa]	AISI 304	157	142	127	118	110	104	98	95	92
	AISI 304L	147	132	27.4	108	100	94	89	85	81

*Mechanické vlastnosti*

Materiál AISI 304 má velmi dobrou tažnost za studena a lze ho plasticky zpevňovat.

*Svařování*

Svařitelnost této slitiny je dobrá. Přídavný materiál by měl mít stejné chemické složení nebo větší obsah chromu a niklu. Pokud tloušťka svařovaného materiálu přesahuje 6 mm, doporučuje se použít AISI 304L.

*Tváření a obrábění*

Materiál se dobře tváří, ohýbá a ohraňuje za studena, přestože síly potřebně k tváření a elastické odpružení je větší v porovnání s uhlíkatými oceli. Doporučuje se používat efektivní chlazení a ostré nástroje, zejména z důvodu velké houževnatosti a velkého plastického zpevnění materiálu. Nižší zpevnění a vyšší stability austenitu se dosáhne zvýšením obsahu niklu. Obrobitelnost není dobrá, ale dá se obrábět především s použitím ostrých nástrojů. Ocel je ale velmi dobře leštitelná.

[37,41,42,43]

**3.2.2 N155**

Slitina N155 se řadí mezi žárovečné materiály a používá se pro aplikace, kde se vyžaduje dostatečná pevnost a odolnost vůči korozi do teploty 815 °C, lze ji použít až do teplot kolem 1090 °C. Vyznačuje se dobrou houževnatostí a výbornou odolností proti oxidaci.

*Aplikace*

Materiál N155 nachází uplatnění především v leteckém průmyslu. Vyrábí se z něho statory turbín, spalovací komory, výfuková potrubí nebo šrouby vystavené vysokým teplotám. Polotovary se dodávají v podobě tyčí, plechů nebo drátů, jako přídatného materiálu pro svařování.

*Fyzikální vlastnosti*

Hustota je vyšší v porovnání například s materiálem CF3, její hodnota je  $8249 \text{ kg.m}^{-3}$ . Teplota tání se pohybuje v rozmezí 1288 až 1354 °C. Tepelná vodivost při 200 °C odpovídá  $14,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a stoupá s rostoucí teplotou, kdy při 600 °C je rovna  $20,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Koeficient teplotní roztažnosti je při 200 °C  $15,3 \text{ K}^{-1}$  a při 600 °C je  $16,8 \text{ K}^{-1}$ .

*Korozní odolnost*

V tepelně zpracovaném stavu má přibližně stejnou odolnost proti kyselině dusičné jako korozivzdorné ocele. Za pokojové teploty je v porovnání s korozivzdornými oceli odolnější vůči slabým roztokům kyseliny sírové a chlorovodíkové.

[44,45]

*Chemické složení*

Jedná se o ocel s velkým zastoupením legujících prvků, především chromu, kobaltu a niklu, jejichž obsahy se pohybují kolem 20 %.

**Tab. 21: Chemické složení materiálu N155 [46]**

Prvek [%]	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Fe	Mo	N	Nb + Ta	Ni	W
Min	0,10		1,50			19,0	21,0	Bal.	2,50	0,10	0,75	19,0	2,5
Max	0,20	1,00	2,00	0,04	0,03	21,0	22,5		3,50	0,20	1,25	21,0	3,0

*Mechanické vlastnosti*

**Tab. 22: Mechanické vlastnosti materiálu N155 homogenizačně žíhaného při 1177 °C a chlazeného na vzduchu při různé teplotní zátěži [44]**

Teplota [°C]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
20	407	814	40
538	303	641	37
649	290	552	35

760	262	414	35
871	179	262	37
982	124	131	38
1093	-	69	45

(Poznámka: Bal. = Balance (základní složka slitiny))

#### Svařování, obrábění a tváření

Materiál je svařitelný pomocí většiny běžných metod (MIG a TIG). Jako přídatný materiál se používá ke svařování slitin podobného chemického složení. Obrobitelnost je podobná austenitickým korozivzdorným ocelím, tedy není dobrá, ale lze obrábět. N155 se vyznačuje velkou houževnatostí. Během tváření za studena se zpevňuje a doporučuje se po procesu tváření homogenizační žíhání k obnovení houževnatosti.

[47,48]

### 3.2.3 IN-738LC

Jedná se o materiál velice dobře odolný proti korozi a vysokoteplotnímu creepu, spadá tedy do skupiny žárovepevných materiálů. Je precipitačně vytvrditelný, taví se a odlévá ve vakuu. Vývoj tohoto materiálu byl koncipovaný k použití do plynových turbín. IN-738LC je tedy creepově odolný až do teplot dosahujících 1800°F (982°C) při jeho dlouhodobému vystavování korozivnímu prostředí odpovídajícímu prostředí v plynových turbínách. Příčinou creepové pevnosti za vysokých teplot je velmi hrubozrnná struktura materiálu.

V porovnání například s široce rozšířenou slitinou 713C vykazuje lepší mez pevnosti v tahu a vyšší mez pevnosti při tečení zároveň s vyšší korozní odolností vůči sloučeninám síry.

V označení IN-738LC se skrývá označení Inconel a Low Carbon. Jedná se tedy o slitinu niklu s chromem dolegovanou molybdenem, hliníkem, titanem a niobem k získání precipitačně vytvrditelného materiálu s nízkým obsahem uhlíku. Inconely obecně obsahují velké množství niklu mezi 50 až 70 %. [27,49,52]

#### Chemické složení

Z tabulky chemického složení (Tab. 23) je patrný rozdíl pouze v obsahu uhlíku, který se u IN-738LC pohybuje kolem 0,1 % a obsah zirkonia je dvakrát menší než u modifikace uhlíkové, tedy kolem 0,05 %. V tabulce se objevuje zkratka LAP (= Low As Possible), která v překladu znamená tak nízký obsah, jaký je z metalurgického hlediska možný dostat.

Snížený obsah uhlíku v podstatě nemá významný vliv na změnu mechanických vlastností. Důvodem je technologická stránka a to konkrétně lepší slévateľnost využitelná zejména ve velkých odlitcích. Za stejným účelem je pak snížen i obsah zirkonia. [49]

**Tab. 23: Porovnání chemického složení materiálu IN-738C a IN-738LC [49]**

Chemické složení niklové slitiny IN-738				
Prvek	IN-738C		IN-738LC	
	Rozsah	Nominál	Rozsah	Nominál
C	0,15-0,20	0,17	0,09-0,13	0,11
Co	8,00-9,00	8,5	3,00-9,00	8,5
Cr	15,70-16,30	16	15,70-16,30	16
Mo	1,50-2,00	1,75	1,50-2,00	1,75
W	2,40-2,80	2,6	2,40-2,80	2,6
Ta	1,50-2,00	1,75	1,50-2,00	1,75
Nb	0,60-1,10	0,9	0,60-1,10	0,9
Al	3,20-3,70	3,4	3,20-3,70	3,4
Ti	3,20-3,70	3,4	3,20-3,70	3,4
Al + Ti	6,50-7,20	6,8	6,50-7,20	6,8
B	0,005-0,015	0,01	0,007-0,012	0,01
Zr	0,05-0,15	0,1	0,03-0,08	0,05
Fe	max 0,05	LAP	max 0,05	LAP
Mn	max 0,02	LAP	max 0,02	LAP
Si	max 0,30	LAP	max 0,30	LAP
S	max 0,015	LAP	max 0,015	LAP
Ni	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.

(Poznámka: Bal. = Balance (základní složka slitiny)

LAP = as Low As Possible (nejnižší možný obsah))

#### Tepelné zpracování

Nejlepší kombinaci mechanických vlastností však slitina IN-739 získává až po tepelném zpracování. Inconel se nechá žíhat po dobu 2 hodin při teplotě 2050°F (1121°C) a poté se zakalí na vzduchu. Následuje popouštění při teplotě 1550°F (843°C) po dobu 24 hodin s následným ochlazením na vzduchu. [49]

#### Základní fyzikální vlastnosti

**Tab. 24: Fyzikální vlastnosti IN-738LC [49]**

hustota	$\rho = 8,11 \text{ g.cm}^{-2}$
rozsah teplot tání materiálu	$T_T = (1230 - 1315)^\circ\text{C}$

*Odolnost proti korozi*

Inconel 738 má vyšší odolnosti proti korozi než jiné vysoce legované slitiny. Odolává oxidaci do 2000 °F (1093 °C) a proti vlivům oxidu siřičitého nebo sulfanu odolá až do 1800 °F (982 °C). [50]

*Mechanické vlastnosti*

Tab. 25 uvádí mechanické vlastnosti Inconelu 738 při pokojové teplotě. Modifikace IN-738LC (low carbon) vykazuje nárůst houževnatosti (tažnosti a kontrakce) oproti Inconelu s vyšším obsahem uhlíku na úkor snížení meze kluzu  $R_{p0,2}$  a meze pevnosti  $R_m$ . [49]

**Tab. 25: Mechanické vlastnosti IN-738 při pokojové teplotě [49]**

Slitina	Mechanické vlastnosti		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
IN-738C	950	1100	5,5
IN-738LC	900	1030	7

**Tab. 26: Meze pevnosti při tečení materiálu IN-738 pro jednotlivé teploty a časy [49]**

Teplota [°C]	$R_{mt}$ [MPa]			
	IN-738LC		IN-738C	
	1000 hod	10 000 hod	100 hod	1000 hod
732	552	427	662	538
816	317	228	455	331
927	131	83	214	138
982	83	48	131	83

V Tab. 26 jsou uvedeny hodnoty meze pevnosti při tečení v závislosti na teplotě a době, po kterou byl materiál vystavován teplotě a zatížení.

*Podmínky pro odlévání*

Obvykle se Inconel 738 taví a odlévá ve vakuu. Typické podmínky pro odlévání jsou 93 až 204 °C nad teplotu likvidu s předehřátím formy na 816 až 982 °C. Obecně podmínky závisí na tvaru a velikosti odlitků. IN-738LC byl vyvinut zejména k zlepšení slévárenských vlastností pro rozměrově velké odlitky. [49]

### Použití

Inconel 738 se používá především jako materiál součástí plynových turbín, jako jsou lopatky nebo celá kola turbín, nebo také do leteckých motorů. Hlavním požadavkem na tento materiál jsou vysoké mechanické vlastnosti při pracovních teplotách turbín a vysoká odolnost proti oxidaci a sulfidaci. [49]



**Obr. 30: Lopatka z IN-738LC [51]**    **Obr. 31: Oběžné kolo turbíny z IN-738LC [53]**

### Nevýhody

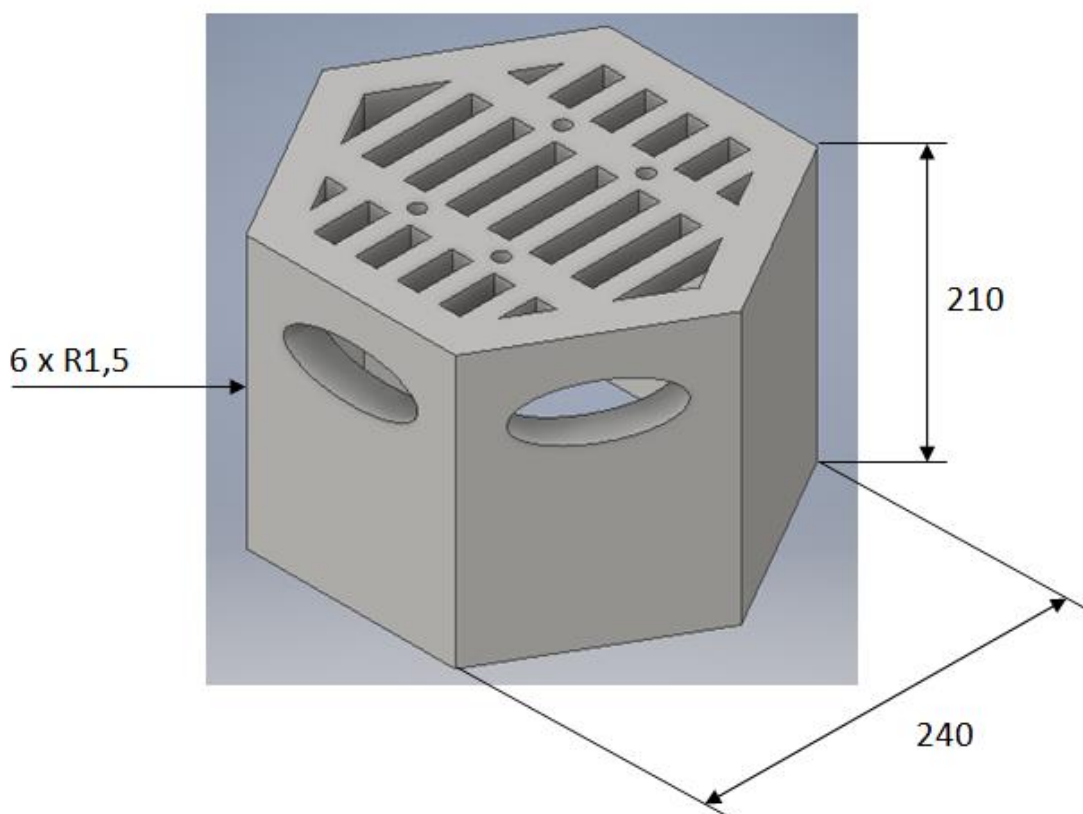
Vysoká korozní odolnost je získána především vyšším obsahem Cr. Chrom však omezuje přítomnost jiných prvků, jako jsou Al, Ti nebo Nb, které tvoří vytvrditelné fáze. Z toho důvodu je objemový podíl fází pouze 45 %. Hlavní nevýhodou je především cena materiálu. [49,52]



## 4 Analýza a vyhodnocení technologičnosti konstrukce zadaného odlitku a stávající výrobní technologie

Analýza a vyhodnocení technologičnosti konstrukce mého studovaného odlitku bude v této práci zmíněna jen zčásti z důvodu určitého „know-how“ firmy. Pokusím se přiblížit základní rozměry, hmotnost a schématickou podobu pro představu, která je důležitá pro pochopení dané problematiky.

Na následujícím *Obr. 32* jsem schématicky znázornil zadaný odlitek s hlavními rozměry. Jedná se o odlitek využívaný v energetickém průmyslu. Vsázka na jeden odlitek váží kolem 65 kg.



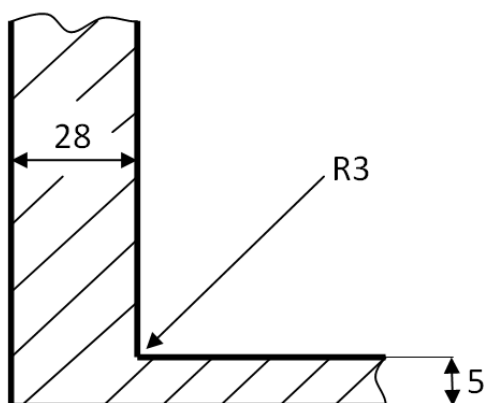
**Obr. 32: Schématické znázornění zadaní odlitku**

Odlitek lze rozdělit do dvou hlavních částí – tělo a mřížka. Tělo zahrnuje navíc čtyři poměrně velké otvory umístěné, jak je vidět na *Obr. 32*, v protilehlých stěnách šestistěny. Povrchové vady, na jejichž opravu se vynakládají poměrně velké náklady ve smyslu

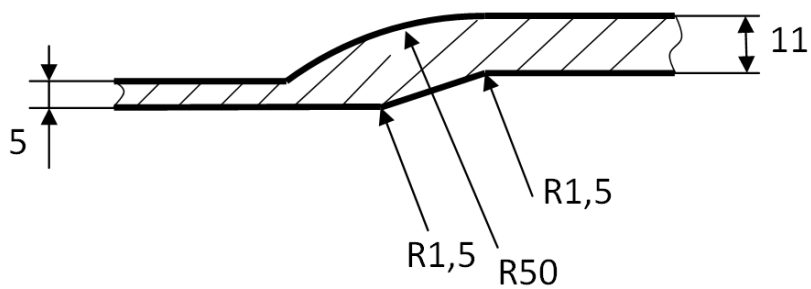
opotřebování nástrojů i ve smyslu velké časové náročnosti, se vyskytují po celém povrchu odlitku. Nejedná se tedy pouze o nesprávnou volbu vtokové soustavy, ale zásadní vliv na kvalitu bude mít jiný faktor.

Nicméně jak je zjištěno dále v *Kap. 5*, vady odlitku jsou vměstky, které se vyskytují v celém objemu materiálu, na povrchu se pouze projevují a je třeba jejich opravy. Obecně se jedná poměrně o složitý odlitek, který není jednoduché zavtokovat a zanálitkovat tak, aby nedocházelo i k jiným typům vad, zejména staženinám. V současné době jsou nálitky poměrně masivní, aby byly schopny zaplňovat odlitek tekutým kovem po celou dobu tuhnutí. Případnou věcí k diskuzi, která není předmětem této práce, by byla analýza mohutné vtokové soustavy s velkými nálitky, provedení důkladných simulací a na jejich základě optimalizovat celý vtokový systém. Případné změny v technologii by vedly k úspoře materiálu a snížení výskytu vad jako jsou staženiny a porezita. Vše je spjato se snížením výrobních nákladů, které z důvodu množství oprav nejsou nízké.

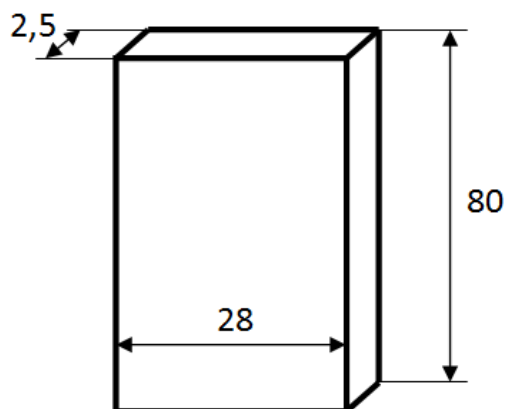
Tvar odlitku je velice složitý, na *Obr. 32* je pouze zjednodušený náznak podoby odlitku. Velké množství žeber jak v horní mřížce o tloušťce 2,5 mm, tak výstuh ze spodní části mřížky s tloušťkou kolem 7 mm, dále otvory v bocích šestistěnu, přechody různých tlouštěk stěn nebo ostré hrany jsou kritická místa při plnění formy a chladnutí odlitku. Tavenina musí mít dobrou slévateľnost, zejména zabíhavost, aby tekutý kov do tenkých částí odlitku dotekl o určité teplotě, která zajistí prolnutí dvou proudů kovu v kritických místech bez vzniku studených spojů. Čistší tavenina bez vměstků a strusky dovoluje snížit teplotu lití, jelikož její slévateľnost je lepší. Tím se zmenší riziko vzniku vad, jako jsou například staženiny. Tloušťka horní mřížky se pohybuje kolem 28 mm a tloušťka šestistěnu, který v dolní části přechází do kruhového profilu (na *Obr. 32* není naznačeno) je v rozmezí od 5 do 12 mm. Tloušťka žeber mřížky odlitků se pohybuje v tolerančním pásmu od 0,4 do 0,6 mm. Nejmenší rádiusy odlitku jsou kolem 1,5 mm. Jelikož je forma na voskový model rozebíratelná a skládá se z mnoha částí, není zapotřebí navrhovat úkosy na žádných částech modelu. V následujících schématech naznačím tři průřezy kritickými místy konstrukce odlitku z pohledu technologa.



Obr. 33: Výrazná změna tloušťky odlitku pod pravým úhlem



Obr. 34: Změna tloušťky odlitku doprovázená nárůstem materiálu ve spojovací části



Obr. 35: Průřez jedním z úzkých žeber odlitku

V rámci vizuální kontroly se jednotlivé klíčové rozměry proměřují. K efektivnější práci se používají kalibrační měrky, zejména v oblasti mřížky. Kromě rozměrů se na vizuální kontrole hlídají také trhliny, studené spoje, lineární vady staženin, staženiny, oxidická kůra a vměstky.

Mimo jiné by bylo potřeba vyřešit pozici odlitku při odlévání vzhledem k množství vměstků, které by se eventuálně eliminovaly také způsobem plnění formy. V současné době se odlitek plní v pozici mřížkou vzhůru, kde tekutý kov je přiváděn bočními nálitky do čtyř nebo dvou stěn a zároveň také horem přes mřížku. To vede pravděpodobně ke značným turbulencím taveniny během plnění. Omezením turbulence je současně dosahováno omezení reoxidace. Cílem by bylo navrhnout, pravděpodobně opět pomocí simulací nebo díky zkušenostem pracovníků v TPV, variantu plynulého, ale zároveň rychlého plnění, kde by se jako poslední části odlitku zaplňovaly tekutým kovem ty, které by bylo možné následně odstranit nebo jednoduše opravit. Jako hrubý návrh varianty bych doporučil spodní plnění formy s obrácenou pozicí odlitku, tedy mřížkou směrem dolů. V oblasti těla, kde by se odlitek plnil nejpozději, bych navrhl slepé nálitky, jež by obsahovaly největší množství vměstků a následně by se odstranily. V *Kap. 5* je uvedena analýza obsahu kyslíku a dusíku u vzorků, které byly odebírány právě z části odlitku, jež se zaplňuje mezi posledními. Zjistilo se, že kvůli citlivosti přístroje se obsahy kyslíku nepodařilo ani naměřit, jak byly vysoké. S největší pravděpodobností se v této oblasti vyskytují oxidické vměstky ve větší koncentraci než uvnitř odlitku nebo v částech, které se zaplňují mezi prvními. Odlitky nikdy nebudou bez vad, ovšem optimalizace jejich výroby představuje mnohdy výrazné snížení nákladů. [54,58]

## 4.1 Postup tavení a lití

Popis tavení a lití zadaného odlitku je podstatný pro pochopení výchozího technologického postupu. Tavení materiálu ve formě „housek“ probíhá v indukční peci ACEC 100 od již zaniklého rakouského výrobce KOPP s výkonem 100 kW. Maximální vsázka se pohybuje kolem 100 kg materiálu.



**Obr. 36: Ovládací panel pece ACEC 100**



**Obr. 37: Ústí pece**



**Obr. 38: ACEC 100**

Vsázka je do pece vkládána pomocí kleští (viz Obr. 39 Obr. 39).



**Obr. 39: Vkládání vsázky do pece**



**Obr. 40: Vsázka**



**Obr. 41: Zahájení tavení materiálu**



**Obr. 42: Tavení materiálu**

Po natavení materiálu, které probíhá cca 30 min, se dodatečně přidávají potřebné legující prvky vhozením v papírovém sáčku. Důvodem je kompenzace jejich propalu během tavení. Taviči poznají zhruba teplotu taveniny dle tvaru bublající lázně a podle rozstříku a záblesku vhozením malého množství SiCa do taveniny určí, na základě zkušeností, kde se teplota přibližně pohybuje. Následuje vyčištění taveniny zasypáním rafinačního prostředku (převážně  $\text{SiO}_2$  + malé množství MnO). Zasypávání taveniny probíhá ve více krocích, aby se dosáhlo téměř dokonalého vyčištění hladiny (cca 5x). Na povrchu taveniny se po přidání rafinačního prostředku vytvoří skelná vrstva, kterou lze odstraňovat pomocí speciálního nástroje v podobě tyče.



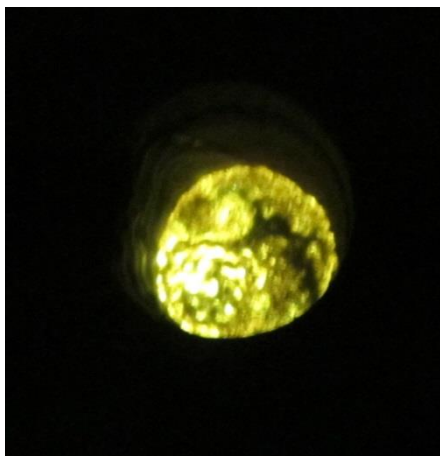
**Obr. 43: Legující prvky potřebné dodat do taveniny**



**Obr. 44: SiCa**



**Obr. 45: Rafinační prostředek**



Obr. 46: Tavenina se struskou



Obr. 47: Tavenina po odstranění strusky



Obr. 48, Obr. 49, Obr. 50: Postup vybírání strusky z povrchu taveniny (čištění taveniny)

Po dosažení požadované teploty v peci se vyjme předehřátá skořepina z plynové pece a ustaví se na přípravek, který zajistí po odlití usměrněné tuhnutí chlazením pomocí tlakového vzduchu.



Obr. 51, Obr. 52, Obr. 53: Měření teploty v peci, vytažení skořepiny z předehřívací plynové pece a ustavení na přípravek

Sifonová pánev je s předstihem nahřáta hořákem a těsně před zaplněním roztaveným kovem z pece se do ní vhodí hliník zabalený do alobalu jako dezoxidovadlo (0,06% Al).



**Obr. 54, Obr. 55: Přelévání taveniny z pece do pánve**

Dosažením teploty v pánvi, určené technologem, se zahájí samotné odlévání, které by mělo proběhnout plynule a do určitého času.



**Obr. 56: Měření teploty v pánvi**



**Obr. 57: Odlévání do předehřáté formy**

Okamžitě po odlití se odstraní keramický filtr a hladina kovu ve skořepině se zasype exotermickým zásypem. Po jeho vyhoření se zásyp provádí ještě dvakrát. Zároveň ihned po odlití se pustí tlakový vzduch do přípravku, který zaručuje požadované usměrněné tuhnutí. Na závěr se vtoková jamka přikryje sibalovou vatou tloušťky 80 mm.





*Obr. 58: Vyjmutý filtr po odlití*



*Obr. 59: Zасыpávání taveniny exotermickým zásypem*



*Obr. 60, Obr. 61: Skořepina po odlití*

Se skořepinou se po odlití do druhého dne nemanipuluje.

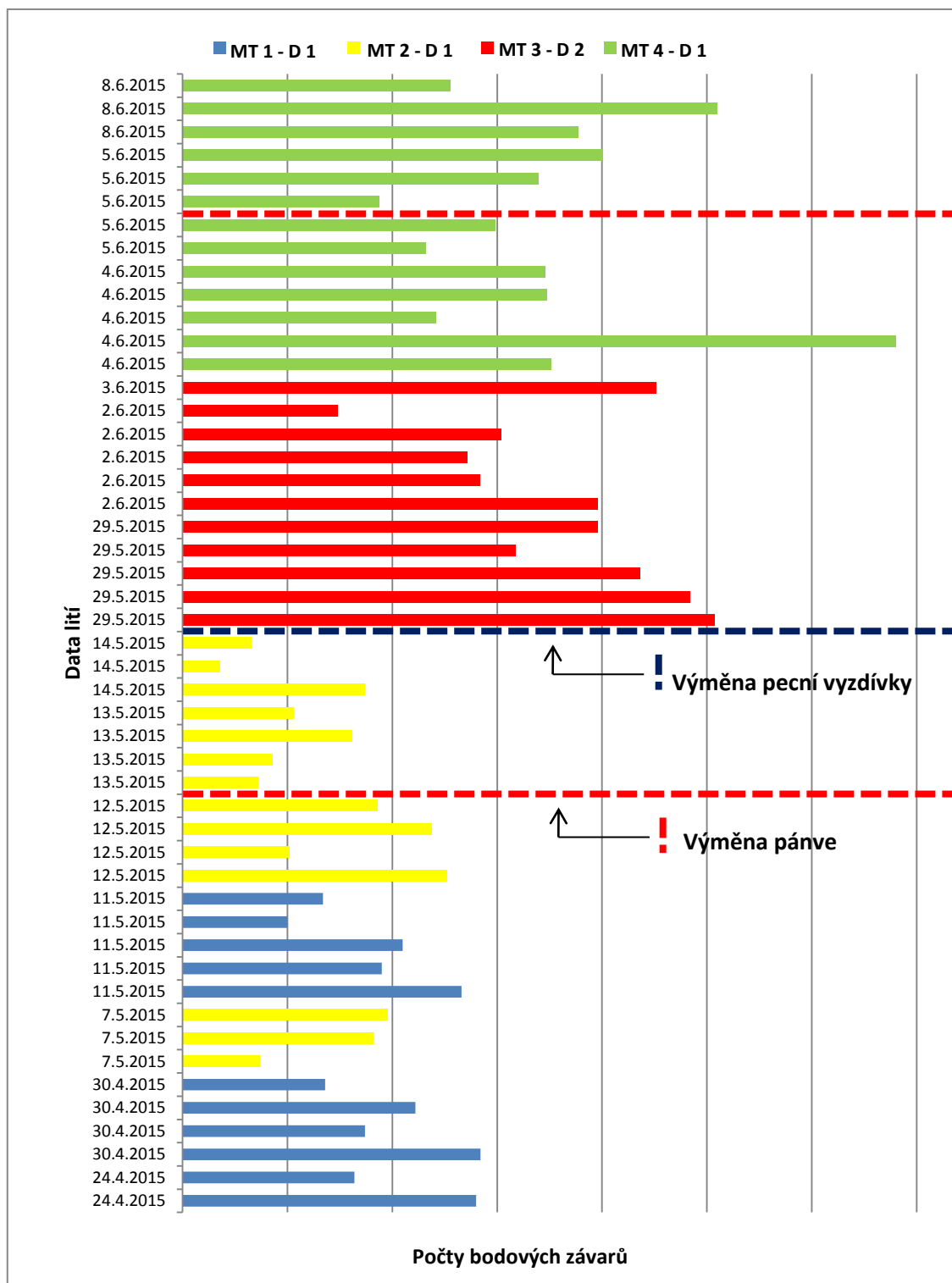
## 5 Návrh racionalizace výrobní technologie s ohledem na potlačení vad odlitků

Prvním krokem při řešení racionalizace stávající technologie bylo sledování tavení a lití přímo na licím poli, kde jsem se sbíral informace od tavičů a slévačů. Jejich dlouholeté zkušenosti s odléváním a tavením různých materiálů jsou nepostradatelné během řešení jakéhokoliv problému souvisejícího s vadami odlitků.

Během několika prvních taveb jsem zpozoroval poměrně hojnou tvorbu strusky, která se před odlitím odstraňuje. Nicméně nikdy není její odstranění dokonalé. Tavič musí odstranit strusku a potom hlídat teplotu, při které se podle technologického postupu přelévá tavenina do pánve. V tomto mezidobí se opět nějaká struska vytvoří, protože tavenina není chráněná a dochází ke kontaktu jejího povrchu se vzduchem.

### 5.1 Pecní vyzdívka

Podle názorů tavičů se používá nedokonalá pecní vyzdívka, která se údajně drolí. Proto mým prvním krokem bylo navrhnout, jakým způsobem sledovat kvalitu odlitků v závislosti na výměně pecní vyzdívky a výměně pánví. Během rozboru situace jsem zjistil, že na svařovně pracovníci u tohoto druhu odlitku zaznamenávají počet bodových závarů při opravách. Začal jsem tedy sbírat data a porovnávat nejprve počty vad na jednotlivých odlitcích v závislosti na výměně pecní vyzdívky a pánví (viz *Graf 2 + Přílohy*).



Graf 2: Časová závislost počtu bodových závadů pro jednotlivé odlitky

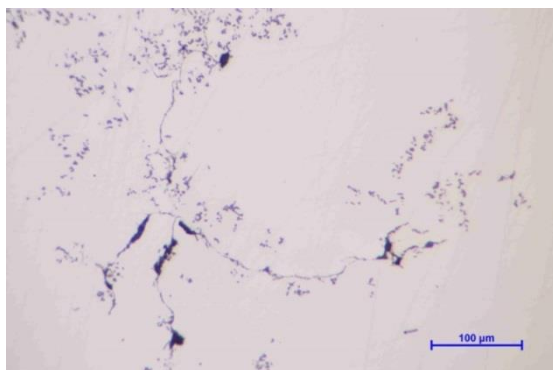
(Poznámka: MT = Mateřská tavba, D = Dodavatel)

V Grafu 2 a přílohách je znázorněná závislost počtu bodových závadů na jednotlivých odlitcích v průběhu roku 2015, kdy byly jednotlivé kusy odlévány. Tento způsob grafického

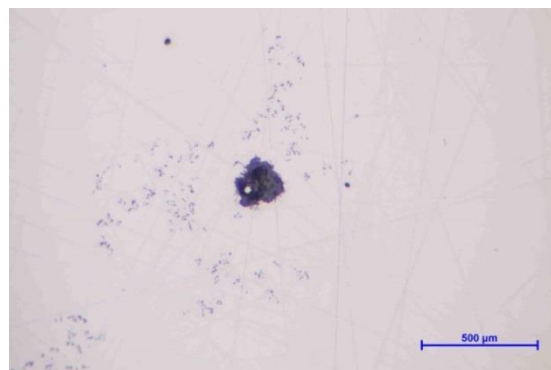
vyhodnocení měl zjistit, zda má výměna pánve nebo pecní vyzdívky výrazný vliv na kvalitu odlitků. Výsledky však nejsou jednoznačné a nelze tedy potvrdit prvotní myšlenku, že právě pecní vyzdívka nebo pánev jsou příčinami snížené kvality produktů. Pouze v *Grafu 2* lze pozorovat poměrně markantní zhoršení kvality odlitků mezi 14. 5. 2015 a 29. 5. 2015. Tento skok by se dal ovšem zdůvodnit více faktory nebo jejich kombinací. Zaprvé se zaformovala nová pecní výduska. Žádné změny v druhu, složení nebo pracovním postupu její tvorby nejsou zaznamenány. Mohlo by se tedy jednat o kvalitu provedené práce ze strany dělníků, zejména pravděpodobně ve vydusání vyzdívky. Další možnou variantou je změna dodavatele materiálu CF3. Využívá se však služby dvou dodavatelů, kteří se střídají podle dostupnosti jejich zboží. Jediným vysvětlením by bylo, že kvalita materiálu od dodavatele 1 se během roku snížila. V neposlední řadě také nelze vyloučit lidský faktor během hodnocení kvality. Nelze brát v potaz pouze počet vad. Grafické výstupy neprokázaly výrazný vliv na kvalitu odlitků v závislosti na změnu pecní vyzdívky nebo pánve.

## 5.2 Analýzy vybraných odlitků

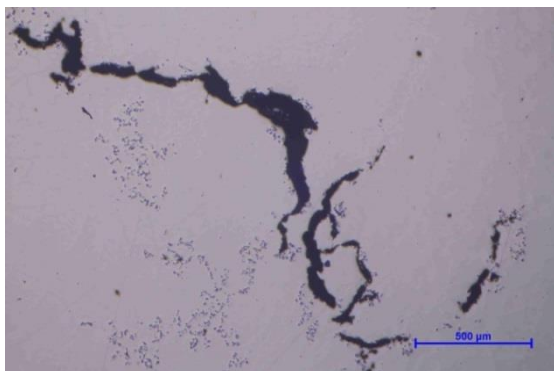
Provedl jsem výbrusy částí odlitků, které jsem měl k dispozici, a na následujících obrázcích jsou vybrané typy vad, které byly zastoupeny nejčastěji. Při rozboru jednotlivých metalografických výbrusů lze vyslovit závěr, že většina vměstků se vyskytuje v podobě blan nebo plen. Jejich vznik si vysvětluji jako zoxidování povrchu taveniny, vytvoření blány, která se následně při odlévání dostane do odlitku. Mimo vměstků ve tvaru blány se v odlitcích vyskytují v menším zastoupení také vměstky většinou oválných tvarů.



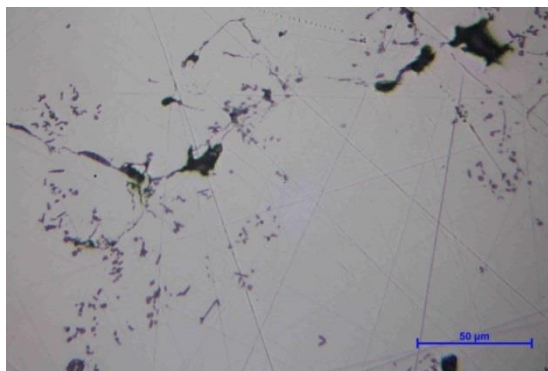
Obr. 62: Příklad vměstku z odlitku



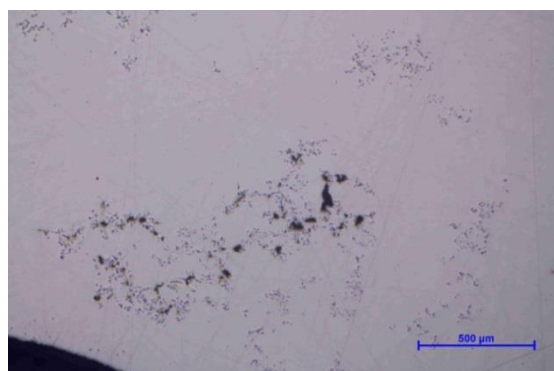
Obr. 63: Příklad vměstku z odlitku



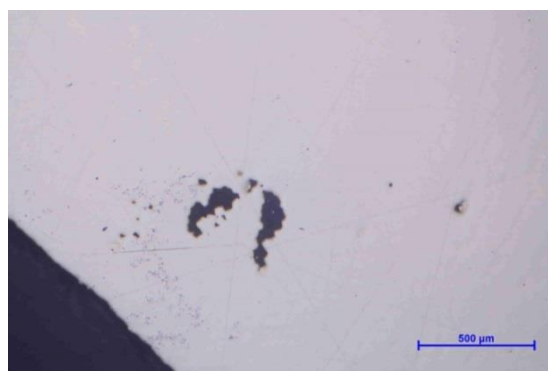
Obr. 64: Příklad vmětku z odlitku



Obr. 65: Příklad vmětku z odlitku



Obr. 66: Příklad vmětku z odlitku



Obr. 67: Příklad vmětku z odlitku

### 5.2.1 Chemická analýza vměstků z materiálu CF3

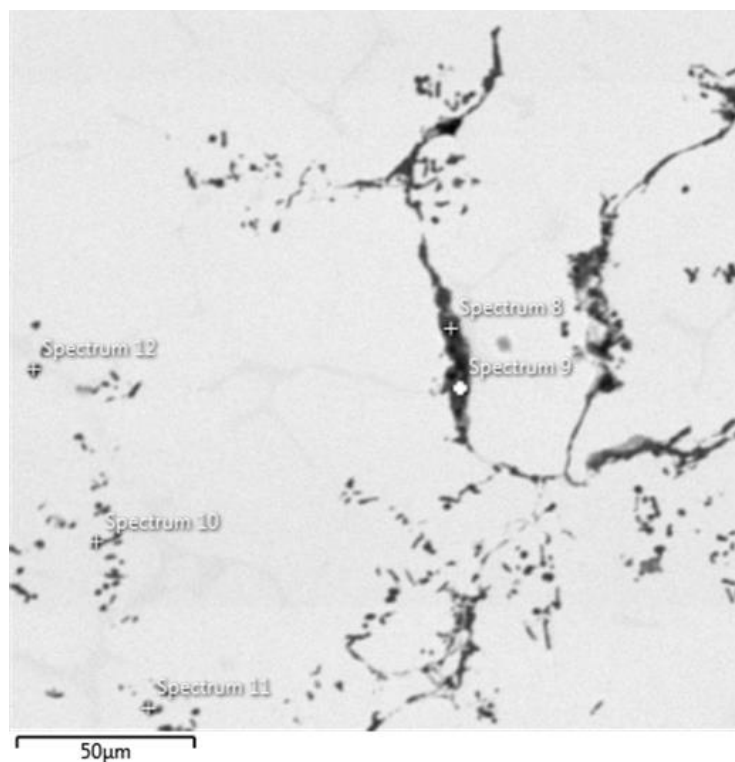
Chemickou analýzu jsem prováděl ve spolupráci s doc. Ing. Pavlem Novákem, Ph.D. na VŠCHT v Praze. Analýza se prováděla na elektronovém mikroskopu.

Jak bylo uvedeno výše, použitým materiálem pro můj zadaný typ odlitku je materiál s označením CF3, který chemicky odpovídá korozivzdorné nízkouhlíkaté oceli AISI 304L. Jeho chemické složení je uvedeno v Tab. 27 Tab. 27: *Chemické složení materiálu CF3 (AISI 304L)*:

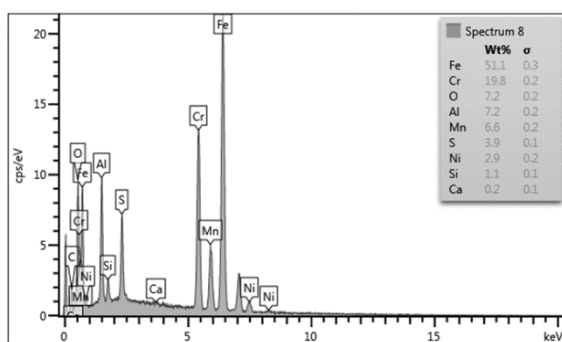
Tab. 27: *Chemické složení materiálu CF3 (AISI 304L) [40]*

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co
Obsah [%]	Min	-	-	-	-	-	17	8	-
	Max	0,03	2	1,5	0,04	0,04	21	12	0,05

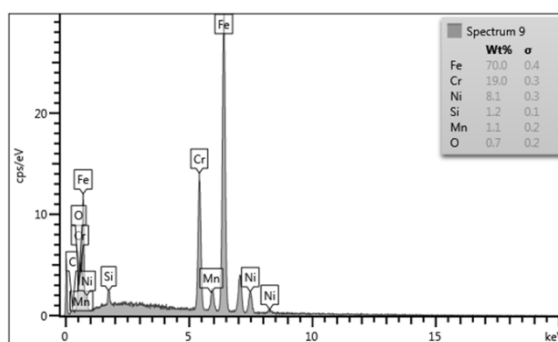
Chemická analýza vměstku v podobě oxidické blány



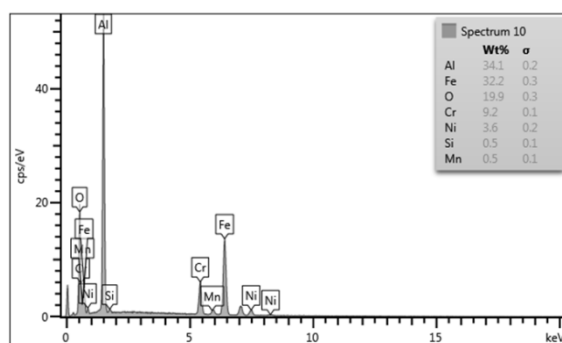
Obr. 68: Chemická analýza vměstku v podobě blány



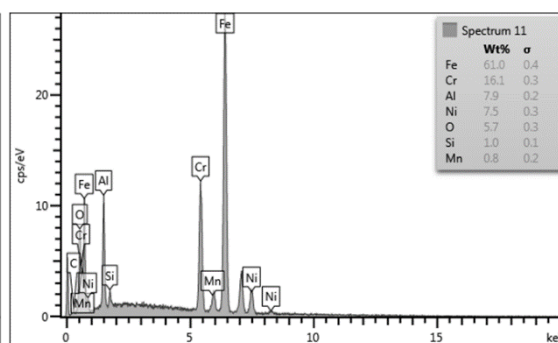
Graf 3: Analýza Spectra 8



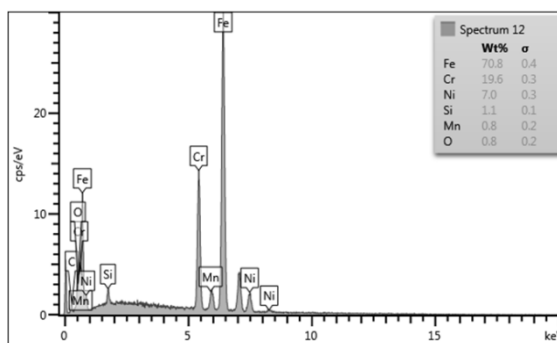
Graf 4: Analýza Spectra 9



Graf 5: Analýza Spectra 10



Graf 6: Analýza Spectra 11



Graf 7: Analýza Spectra 12

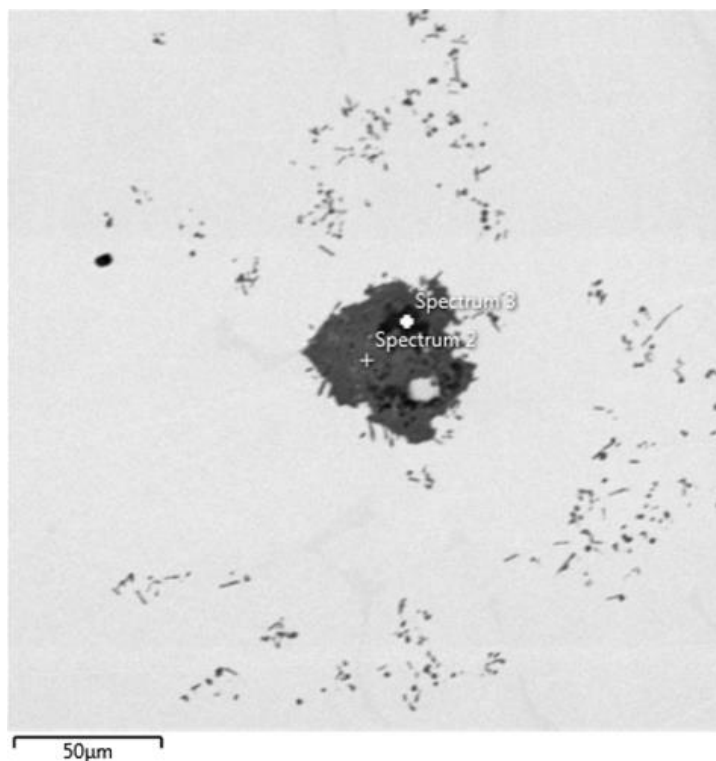
Tab. 28: Chemická analýza vměstku v podobě blány v jednotlivých oblastech

Spectrum 8	Prvek	Fe	Cr	O	Al	Mn	S	Ni	Si	Ca
	Obsah [%]	51,1	19,8	7,2	7,2	6,6	3,9	2,9	1,1	0,2
Spectrum 9	Prvek	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	O			
	Obsah [%]	70	19	8,1	1,2	1,1	0,7			
Spectrum 10	Prvek	Al	Fe	O	Cr	Ni	Si	Mn		
	Obsah [%]	34,1	32,2	19,9	9,2	3,6	0,5	0,5		
Spectrum 11	Prvek	Fe	Cr	Al	Ni	O	Si	Mn		
	Obsah [%]	61	16,1	7,9	7,5	5,7	1	0,8		
Spectrum 12	Prvek	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	O			
	Obsah [%]	70,8	19,6	7	1,1	0,8	0,8			

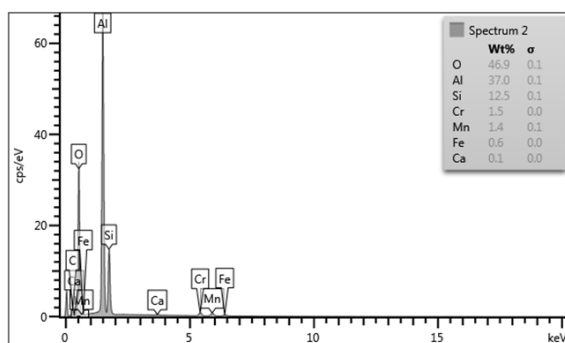
- *Spectrum 8* – Dle chemického složení oblasti označené jako Spectrum 8 podíl základních prvků (Fe, Cr, Ni) by mohl naznačovat zhruba 30 % obsahu základní fáze. Jedná se pouze o odhad, jelikož nelze tvrdit, kolik procent jednotlivých prvků náleží základnímu materiálu a kolik procent je vázáno například v oxidech nebo dalších sloučeninách. Pokud je některý prvek zastoupen ve větším procentuálním zastoupení, než je obsažen v základním materiálu, bude se vyskytovat pravděpodobně v oxidovaném stavu. Pro tuto oblast je to například Mn a Al, které se budou vyskytovat například ve stavech MnO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- *Spectrum 9* – Tato oblast bude převážně základní materiál.
- *Spectrum 10* – V oblasti s označením Spectrum 10 bude obsažena zhruba polovina základního materiálu, ovšem se velkým zastoupením hliníku pravděpodobně ve sloučenině Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- *Spectrum 11* – Tato oblast obsahuje převážně základní materiál s menším množstvím hliníku než je tomu ve Spectru 10 ( $Al_2O_3$ ).
- *Spectrum 12* – Zde se stejně jako ve Spectru 9 vyskytuje převážně základní materiál.

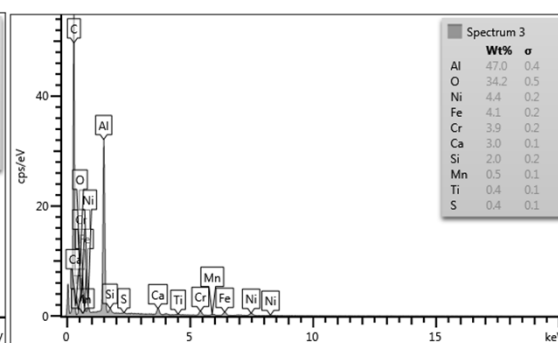
Chemická analýza oválného vmětku



Obr. 69: Chemická analýza oválného vmětku



Graf 8: Analýza Spectra 2



Graf 9: Analýza Spectra 3

Tab. 29: Chemická analýza oválného vmětku v jednotlivých oblastech

Spectrum 2	Prvek	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ca			
	Obsah [%]	46,9	37	12,5	1,5	1,4	0,6	0,1			



Spectrum 3	Prvek	Al	O	Ni	Fe	Cr	Ca	Si	Mn	Ti	S
	Obsah [%]	47	34,2	4,4	4,1	3,9	3	2	0,5	0,4	0,4

- *Spectrum 2* – Analýza z oblasti Spectrum 2 naznačuje, že v ní není zastoupen vůbec žádný základní materiál. Zastoupený je zde převážně hliník a křemík v oxidickém stavu.

**Tab. 30: Rozdělení obsahu kyslíku k jednotlivým prvkům**

		Molární hmotnost [g/mol]	Obsah [%]
prvek	Al	27	37
	Si	28	12,5
	O	16	47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2xAl	54	37
	3xO	48	33
SiO <sub>2</sub>	1xSi	28	12,5
	2xO	32	14

V Tab. 30 jsem se pokusil vysvětlit, jakým způsobem by se na základě molárních hmotností jednotlivých prvků daly tyto prvky rozdělit do sloučenin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>. Znamená to, že celkové množství 47 % kyslíku se rozdělí v poměru podle molárních hmotností k 37 % hliníku (33 % kyslíku) a 12,5 % křemíku (14 % kyslíku). Celou podstatou mého myšlení je závěr, že všechen kyslík se rozdělí pouze mezi hliník a křemík tak, že vzniknou jen sloučeniny typu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub>.

- *Spectrum 3* – Analýza z této oblasti ukázala podobné výsledky jako ve Spectru 2 pouze s jiným procentuálním zastoupením jednotlivých chemických prvků.

*Závěr chemických analýz jednotlivých druhů vměstků z materiálu CF3*

Chemická analýza vměstků v podobě blan potvrdila, že se jedná o vměstky oxidické. V oblastech označených jako Spectrum 9 a Spectrum 12 je obsažen pouze základní materiál. V ostatních oblastech je zcela jistě základní materiál obsažen také, nicméně v menším množství. Poměrně překvapujícím zjištěním byla detekce hojně zastoupeného hliníku, který se váže s největší pravděpodobností do sloučeniny Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Analýza druhého typu vměstku potvrdila poměrně velké zastoupení hliníku. Mohlo by se jednat také o část odlomené pecní vyzdívky, která je převážně tvořená korundem. Tyto typy vměstků budou v odlitcích zcela jistě zastoupeny také, nicméně v tomto případě bych je vyloučil. Důkazem je fakt, že výduska se skládá přibližně z 85%  $Al_2O_3$  a 15 % MgO. Hořčík se však nenašel v analýze žádný, naopak se zde vyskytuje velké množství křemíku. Dalším důkazem by mohl být také tvar vměstku, který není tak striktně ohraničen nebo zakulacen, což by naznačovalo právě na vměstek z výdusky.

Neočekávaným výsledkem je velké množství hliníku, které je v tomto případě pravděpodobně způsobeno dezoxidací taveniny čistým hliníkem při přelévání z pece do pánve. Variantou snížení obsahu hliníku je například snížení množství dezoxidovadla nebo jeho nahrazení. Menší množství dezoxidovadla by si žádalo čistší taveninu. Použitím FeSiCa nebo SiTi (využívaného například ve firmě Quality Castings. LLC) by se dal hliník nahradit, ovšem s největší pravděpodobností by vznikaly opět vměstky podobného charakteru s jiným složením.

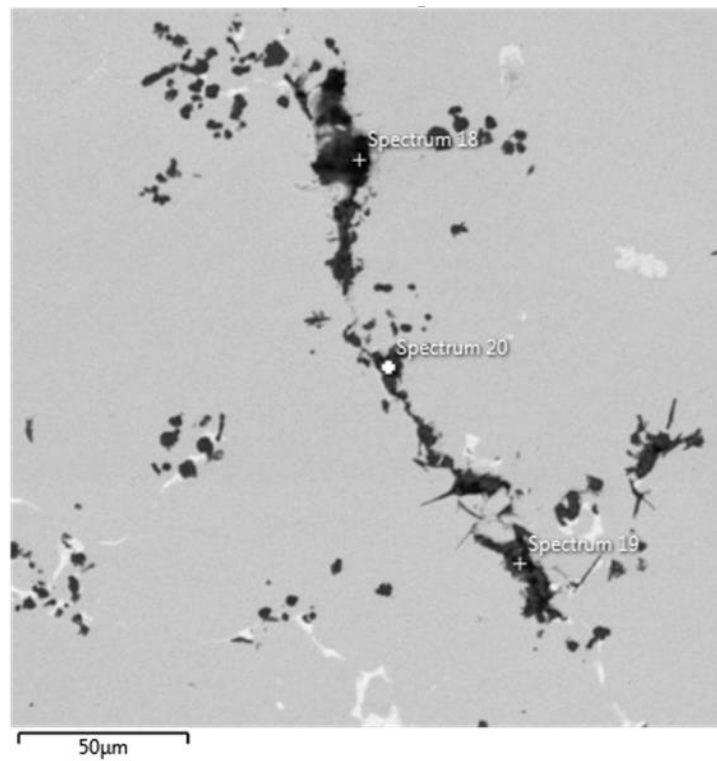
### 5.2.2 Porovnání s analýzou podobných druhů vměstků u materiálu N155

N155 je materiál, který se taví v téměř totožné indukční peci a odlévá způsobem, kdy tavenina není chráněna před okolním prostředím. Chemické složení oceli s označením N155, které se vyznačuje především zvýšeným obsahem chromu, niklu a kobaltu, je uvedeno v následující tabulce:

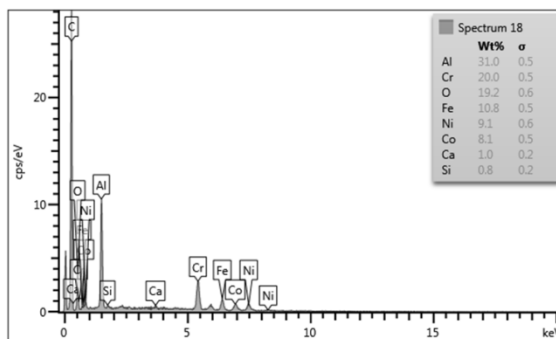
**Tab. 31: Chemické složení materiálu N155 [58]**

N155														
Prvek		C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Fe	Mo	N	Nb + Ta	Ni	W
Obsah [%]	Min	0,10		1,50			19,0	21,0	Bal	2,50	0,10	0,75	19,0	2,5
	Max	0,20	1,00	2,00	0,04	0,03	21,0	22,5		3,50	0,20	1,25	21,0	3,0

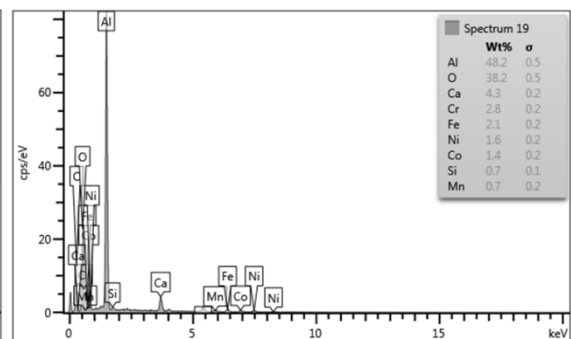
Chemická analýza vměstku v podobě oxidické blány



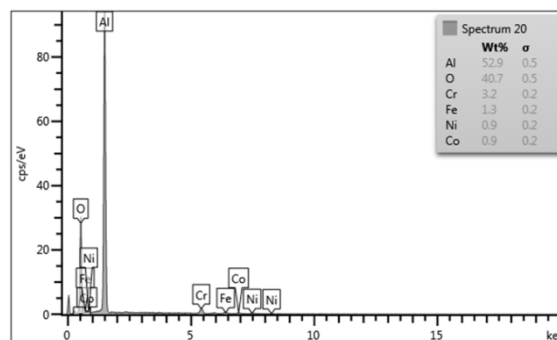
Obr. 70: Chemická analýza vměstku v podobě blány z materiálu N155



Graf 10: Analýza Spectra 10



Graf 11: Analýza Spectra 11



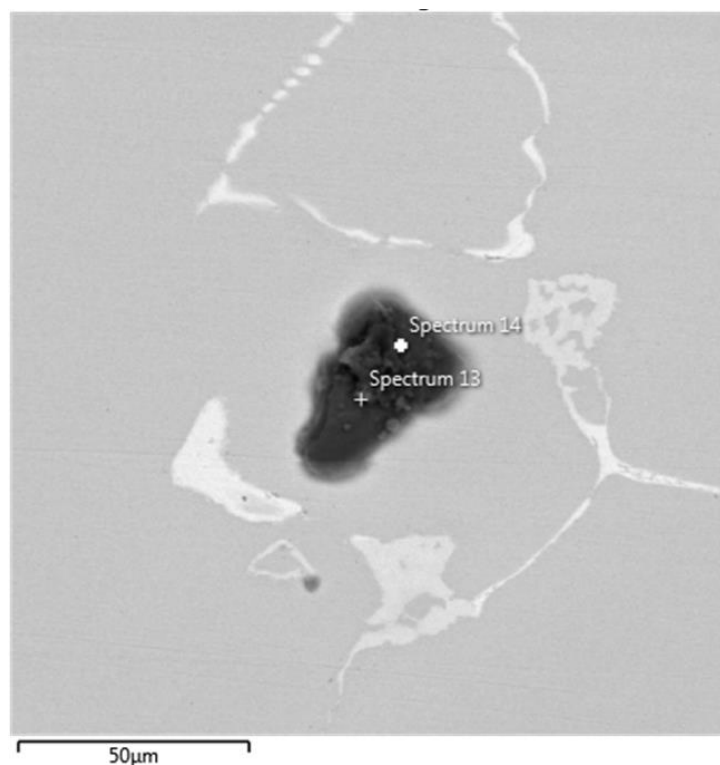
Graf 12: Analýza Spectra 12

Tab. 32: Chemická analýza vměstku v materiálu N155 v podobě blány

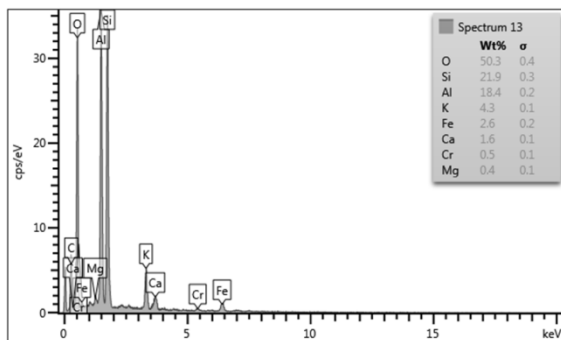
Spectrum 18	Prvek	Al	Cr	O	Fe	Ni	Co	Ca	Si	
	Obsah [%]	31,0	20,0	19,2	10,8	9,1	8,1	1,0	0,8	
Spectrum 19	Prvek	Al	O	Ca	Cr	Fe	Ni	Co	Si	Mn
	Obsah [%]	48,2	38,2	4,3	2,8	2,1	1,6	1,4	0,7	0,7
Spectrum 20	Prvek	Al	O	Cr	Fe	Ni	Co			
	Obsah [%]	52,9	40,7	3,2	1,3	0,9	0,9			

- *Spectrum 18* – V této oblasti by se mohla vyskytovat základní fáze zhruba z jedné třetiny, nicméně nelze to potvrdit. Zcela jistě se však bude hliník a chrom vyskytovat v oxidovaných stavech.
- *Spectrum 19* – Zhruba dvojnásobný obsah kyslíku vzhledem ke Spectru 18 a vysoký obsah hliníku vypovídá především o výskytu oxidu hliníku.
- *Spectrum 20* – V podstatě se jedná o zastoupení pouze oxidu hliníku.

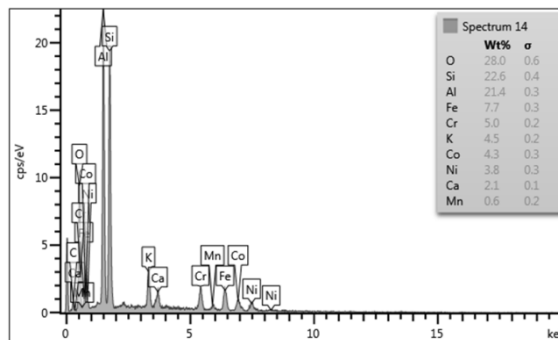
Chemická analýza oválného typu vměstku



Obr. 71: Chemická analýza oválného vměstku z materiálu N155



Graf 13: Analýza Spectra 13



Graf 14: Analýza Spectra 14

Tab. 33: Chemická analýza oválného vměstku v materiálu N 155 v jednotlivých místech

Spectrum 13	Prvek	O	Si	Al	K	Fe	Ca	Cr	Mg		
	Obsah [%]	50,3	21,9	18,4	4,3	2,6	1,6	0,5	0,4		
Spectrum 14	Prvek	O	Si	Al	Fe	Cr	K	Co	Ni	Ca	Mn
	Obsah [%]	28	22,6	21,4	7,7	5	4,5	4,3	3,8	2,1	0,6

- *Spectrum 13* – Jedná se o oblast s oxidy křemíku a hliníku, popřípadě jejich kombinací AlSiO. Draslík se v materiálu nemůže vyskytovat.
- *Spectrum 14* – V podstatě odpovídá oblasti s označením Spectrum 14.

#### Závěr chemické analýzy vměstků z materiálu N155

V porovnání s analýzou vměstků vznikajících při lití odlitků z materiálu CF3 lze vyslovit závěr, že vměstky jsou velice podobného charakteru. Technologie tavení a lití materiálu N155 je velice podobná jako u materiálu CF3. To znamená, že příčina vzniku těchto vměstků bude stejná. Opět jako v předchozím případě i u analýzy vměstků z materiálu N155 byl zjištěn vysoký podíl obsahu hliníku a také křemíku vázaného na kyslík. I v případě N155 se dezoxiduje hliníkem.

#### 5.2.3 Analýza obsahu kyslíku vybraných odlitků

První analýza na obsah kyslíku a dusíku byla prováděna ve spolupráci s Ústavem materiálového inženýrství ČVUT sídlícího v Praze na Karlově náměstí. V *Tab. 34* jsou uvedeny výsledky analýzy kyslíku a dusíku pro tři vybrané vzorky a pro Standard od Alpha resources, který se použil ke kalibraci přístroje.

Analýza se prováděla na vysoce výkonném analyzátoru kyslíku, dusíku a vodíku G8 GALILEO od firmy Bruker. Tento přístroj je schopný rychle a automaticky určit obsah O, N a H

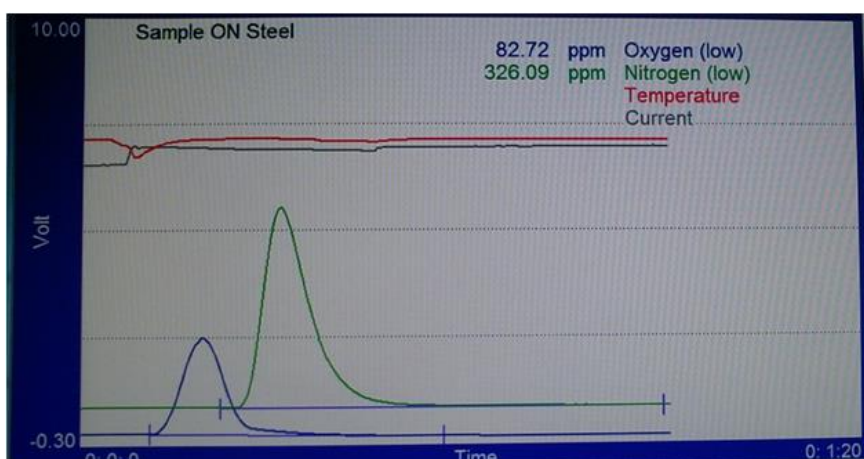
v pevných materiálech. Pracuje na principu IGF (inert gas fusion), kdy se za vysoké teploty nataví vzorek pevného materiálu v grafitovém kelímku. [55]



Obr. 72: Vysoce výkonný analyzátor kyslíku, dusíku a vodíku od firmy Bruker [55]

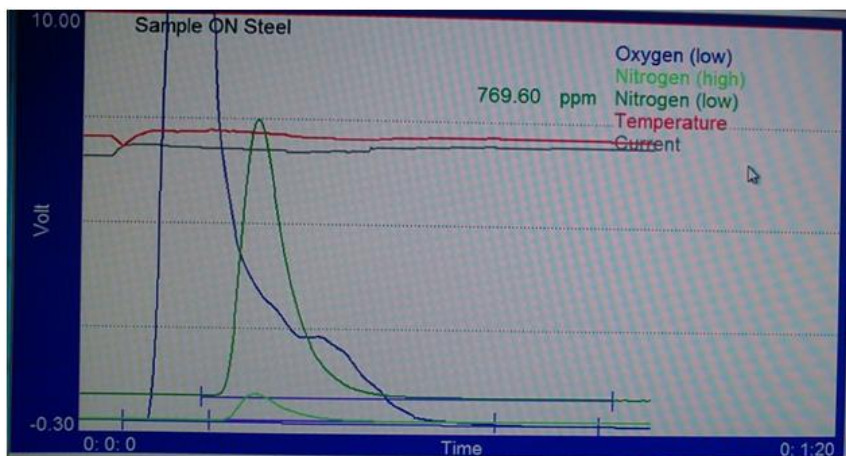
Tab. 34: Výsledky analýzy obsahu kyslíku a dusíku z ČVUT

Vzorek	Obsah [ppm]	
	Kyslík	Dusík
Standard	82,7	326,1
1	-	769,6
2	-	573,3
3	936,2	614,9
průměr	936,2	652,6



Graf 15: Signál z detektorů přístroje pro Standard (kalibrace)

(Poznámka: Modrá křivka – obsah kyslíku  
Zelená křivka – obsah dusíku)



**Graf 16: Signál z detektorů přístroje pro 1. vzorek**  
 (Poznámka: Modrá křivka – obsah kyslíku  
 Zelená křivka – obsah dusíku)

Měření obsahu dusíku proběhlo bez problémů. Problémem byl obsah kyslíku, který až na vzorek číslo 3 zasahoval mimo měřitelný rozsah přístroje. Právě vzorek s číslem 3 pocházel z odlitku, který se experimentálně odléval za sníženého tlaku (kolem 15 mbar). Jednalo se o pokus eliminovat vměstky v odlitcích, ovšem objevily se další technologické problémy, a proto se od této varianty upustilo. Další dva vzorky byly vybrány z odlitků podle počtu bodových závarů. Vybral jsem tedy nejkvalitnější a nejhorší kus z celé výroby za jeden rok, jelikož se vzorky pro chemickou analýzu uchovávají několik let. Předpokládal jsem totiž nižší obsah kyslíku u vzorku s číslem 1, který byl poměrně kvalitní a naopak vyšší obsah kyslíku u vzorku s číslem 2. Nic takového se neprokázalo. Všechny vzorky byly odebírané z přílítku na vlastním odlitku, který slouží jako vzorek pro chemickou analýzu jednotlivých odlitků.

Aby se potvrdily výsledky první analýzy z ČVUT, analyzovaly se jiné vzorky znovu ve společnosti ENVIFORM a.s. sídlící v Třinci.

**Tab. 35: Výsledky analýzy obsahu kyslíku a dusíku z ENVIFORMu a.s.**

Vzorek	Obsah [ppm]	
	Kyslík	Dusík
Číslo 2	81 - 750	499
Číslo 3	147 - 162	369
Číslo 4	92 - 304	349
průměr	-	406

Vzorky, které se analyzovaly, byly poněkud odlišného charakteru. Na rozdíl od první varianty, kdy se použily přílitky pro chemickou analýzu na jednotlivých odlitcích, se tyto vzorky odlévaly samostatně jako zkušební tělesa pro zjištění mechanických vlastností.

Analýza obsahu dusíku proběhla opět bez problémů, nicméně s nižšími hodnotami než tomu bylo v předchozí analýze. Průměrný obsah dusíku se pohyboval kolem 406 ppm. To je přibližně o 250 ppm méně. Měření kyslíku probíhalo opět s problémy. Povrch vzorků nebyl obroben, proto mohou být výsledky ovlivněny také jinými faktory, jako jsou například stopy korundu ( $Al_2O_3$ ) používaného pro otryskávání hotových odlitků. Přestože nebyla tato analýza provedena dle normy, lze předpokládat vyšší obsah kyslíku i dusíku.

#### 5.2.4 Závěr analýz obsahů kyslíku a dusíku ve vzorcích

Závěr není jednoznačný, nicméně lze s největší pravděpodobností předpokládat zvýšený obsah kyslíku a dusíku ve vzorcích. Ačkoliv se nepodařilo určit přesné obsahy kyslíku v jednotlivých odlitcích, lze se domnívat, že jak obsah dusíku, tak obsah kyslíku v odlitcích je zapříčiněn kontaktem mezi taveninou a okolním vzduchem. Cílem bude tyto obsahy minimalizovat.

Budu-li porovnávat obě analýzy, musím brát v úvahu původ jednotlivých vzorků. Pro první analýzu prováděnou v Ústavu materiálového inženýrství v Praze byly použity přílitky odlévané na každém odlitku pro určení jejich konkrétního chemického složení. Jelikož se jedná o část odlitku, která je zaplňována tekutým kovem jako jedna z posledních, lze očekávat větší množství vměstků, které mohlo ovlivnit rozbor pro určení obsahu kyslíku. Druhý typ vzorků použitý pro analýzu ve společnosti ENVIFORM a.s. v Třinci byl lity odděleně v podobě zkušebních těles pro určování mechanických vlastností.

Zajímavostí, která potvrzuje myšlenku, že hlavní příčinou zvýšených obsahů kyslíku a dusíku je kontakt taveniny s okolním vzduchem, je výsledek 1. analýzy u vzorku č. 3. Ten jediný byl odebrán z odlitku, u něhož byla snaha tavit a lít ho pod vakuem. Nakonec se dosáhlo pouze sníženého tlaku kolem 15 barů. Nicméně vzorky č. 1 a 2 byly připraveny z odlitků tavených a litych za normálního tlaku ve volné atmosféře a hodnoty obsahu kyslíku se pohybovaly mimo citlivost zařízení.

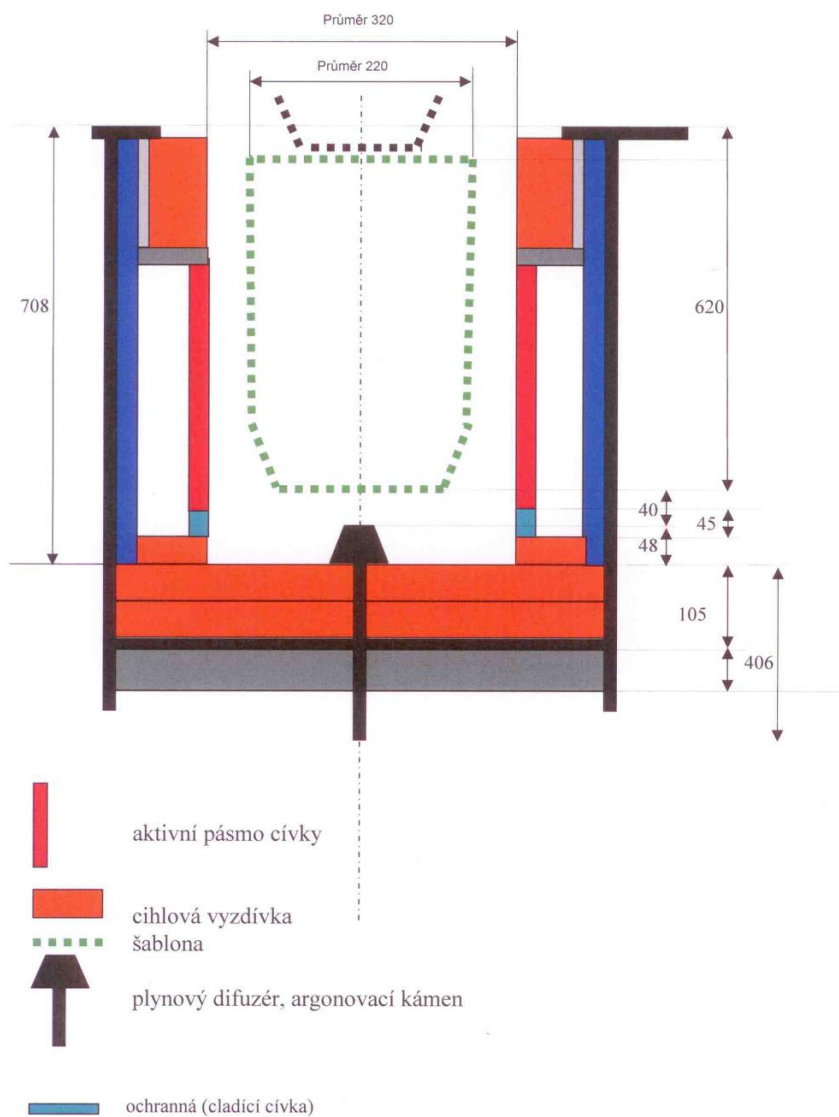


### 5.3 Probublávání taveniny argonem

Od 9. července 2015 se začala tavenina probublávat argonem. Při natavení zhruba třetiny vsázky se zajistí přísun argonu skrze difuzér umístěný na dně kelímku v indukční tavicí peci. Používá se plynový difuzér od firmy Capital Refractories. Ten se umístí na střed šamotové tvarovky, kde se vyvrtá průchozí díra pro přívodní trubku o průměru 20 mm. Následně se difuzér zadusá pecní výduskou až po jeho pracovní rovinu, tzn. cca 48 mm. Samotné dno kelímku se vydusá ještě 40 mm nad difuzér. Pracovní prostor v peci se pak pohybuje kolem 620 mm (viz *Obr. 73*).

Difuzér je připojen k argonové tlakové lahvi s tlakoměrem a ventilem kovovou vysokotlakou hadicí (do 15 barů). Láhev je umístěná v bezpečné vzdálenosti od místa manipulace s tekutým kovem a je zajištěna řetězem (*Obr. 74*). Na plošině pece je pak umístěn regulační ventil, tlakoměr a průtokoměr.

Průtok argonu, ovládaný regulačním ventilem, by se měl pohybovat v rozmezí 5 až 10 litrů za minutu. Při tomto průtoku by se měl tlak držet v rozmezí 2 až 10 barů. V případě tlaku pod 2 bary dochází někde k úniku plynu. Nízký tlak pravděpodobně značí poškození difuzéru nebo se může jednat o vydusání nedostatečně tlusté pecní výdusky na dně pece. Naopak vysoký tlak je zapříčiněn příliš tlustou vrstvou vydusaného kelímku, která způsobuje nedostatečný průnik argonu do taveniny. [56]



Obr. 73: Schématické znázornění zabudování difuzéru [56]



Obr. 74: Umístění a ukotvení tlakové láhve s argonem [56]

### 5.3.1 Vyhodnocování

Argonovat se začala tavenina 9. 7. 2015. Vyhodnocení dělím podle dvou kritérií.

První hledisko zahrnuje mimo počet bodových závarů také subjektivní pocit svářečů, zejména z hlediska velikosti a rozložení vad nebo celkového zasažení konkrétního kusu. V tomto případě se srovnávají jak odlitky s označením A (můj zadaný odlitek), tak i kusy označené písmenem B. Jedná se o odlitky ze shodného materiálu, rozdíl je ve velikosti odlitku a jednodušším tvaru u odlitku B. Dále pak teploty v peci a pánvi jsou o 20 až 30 °C nižší. Nicméně pro analýzu, která zjišťuje pouze úspěšnost argonování za stejných podmínek, tyto rozdíly nehrají roli.

V druhém případě s použitím širší datové základny striktně vymezují odlitky na kusy „OK“ a „Nevyhovující“ dle hranice počtu bodových závarů. Abych mohl provést srovnání, bral jsem v úvahu odlitky lité už od 24. 6. 2015, kdy se začalo lít z nově vydusané pánve.

### 5.3.2 Subjektivní varianta vyhodnocení

Subjektivní hodnocení se provádělo na svařovně. Svářeči měli za úkol nejen zaznamenat počet vad a mapu závary, ale také jednotlivé odlitky subjektivně hodnotit dle jejich zkušeností z předchozích sérií. V potaz se bral především počet, velikost a rozmístění povrchových vad a celkový pocit z rozsahu napadení povrchu. Rozhodujícím parametrem však zůstal počet bodových závarů.

Celkem se tímto způsobem vyhodnotilo 62 odlitků v časovém úseku od 9. 7. 2015 do 25. 8. 2015. Z toho 51 bylo litých z materiálu taveným pod argonem a 11 kusů bez argonu pro srovnání.

Z výsledků vyplývalo, že u odlitků typu A vzrostla s argonem úspěšnost o 42 %. Odlitky B vycházely obecně kvalitnější, s argonem úspěšnost vzrostla jen o 12 %.

Výsledkem subjektivního vyhodnocování provedeného v létě 2015 je jednoznačně zlepšení kvality odlitků probublávaných při tavení argonem.

Láhev argonu o objemu 50 litrů vydržela v tomto případě něco kolem 90 taveb, tzn., že cena jedné tavby se pohybovala kolem 90 Kč.

### 5.3.3 Objektivní varianta hodnocená dle počtu bodových závarů

Objektivní varianta, která bere v potaz pouze počet povrchových vad na odlitcích, rozlišuje opět odlitky na „OK“ a „Nevyhovující“ ovšem pouze dle hranice počtu bodových závarů. Tato varianta byla hodnocena z období od 24. 6. 2015 do 30. 3. 2016, kdy se odlévalo dohromady 373 kusů odlitků s označením A i B. 54 kusů bylo tavených bez ochranné atmosféry a 319 kusů bylo taveno s použitím argonu.

Objektivní varianta hodnocení ukázala rozdílné výsledky vzhledem k variantě subjektivní. V případě odlitků typu A došlo vlivem argonování taveniny ke zlepšení kvality o 16 %. Odlitky typu B však byly dle objektivní varianty hodnocení kvalitnější bez použití argonu.

### 5.3.4 Závěr

V úvahu je třeba vzít také vliv jiných faktorů. Pravděpodobně došlo postupem času k nedostatečnému probublávání argonu a vytracení efektu této metody. Příčinou by mohl být lidský faktor nebo nesprávná instalace difuzéru. Důkazem je spotřeba argonu v období od 1. 10. 2015 do 30. 3. 2016. Plná tlaková láhev obsahuje 200 barů stlačeného argonu a na konci období zbývalo kolem 110 barů. Pomocí stavové rovnice lze spočítat přibližnou průměrnou spotřebu plynu na jednu tavbu.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

$p$  ... tlak [Pa]

$V$  ... objem [ $\text{m}^3$ ]

$n$  ... látkové množství [mol]

$R$  ... molární plynová konstanta  $R = 8,315 \text{ [J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

$T$  ... termodynamická teplota v Kelvinech [K]

Plynová konstanta  $R$  a teplota  $T$  se nemění. Vzhledem k přepočtu stejného množství stlačeného plynu na množství plynu v atmosférických podmínkách považují také látkové množství  $n$  za konstantní.

$$p \cdot V = \text{konst} \quad (3)$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2} \quad (5)$$

Pokud dosadím do vztahu 5 za veličiny  $p_1$  a  $V_1$  hodnoty odpovídající objemu stlačeného argonu v tlakové lahvi a podělím tlakem okolí, zjistím, jaký objem plynu mám k dispozici k probublávání taveniny. Jak bylo uvedeno výše, průtok plynu by se měl pohybovat v rozmezí 5 až 10 litrů za minutu.

$$V_2 = \left( \frac{200 \cdot 50}{1} \right) = 10\,000 \text{ l} \quad (6)$$

Po 191 tavbách zbylo v tlakové lahvi kolem 110 barů argonu. Použitý objem plynu tedy odpovídá 90 barům. Stejně jako v předchozím případě dopočtu objem spotřebovaného argonu.

$$V_2 = \left( \frac{90 \cdot 50}{1} \right) = 4\,500 \text{ l} \quad (7)$$

Budu-li uvažovat stejnou spotřebu argonu pro tavení odlitků typu A i B, získám průměrnou spotřebu inertního plynu na jednu tavbu:

$$\bar{V} = \left( \frac{4500}{191} \right) \approx 24 \text{ l} \quad (8)$$

Pokud budu počítat s dolní hranicí doporučeného průtoku, tedy 5 l/min, mohu zjistit, jak dlouho by muselo probíhat argonování jedné tavby:

$$\bar{t} = \left(\frac{24}{5}\right) \approx 4,8 \text{ min} \quad (9)$$

Vzhledem k tomu, že celá tavba trvá necelých 30 min a přívod argonu by se měl spustit hned po natavení cca třetiny vsázky, lze vyslovit závěr, že přísun argonu byl nedostatečný a to mělo zcela jistě dopad i na kvalitu odlitků.

Pro porovnání vypočítám také průměrný čas argonování pro variantu subjektivního hodnocení, kdy celá tlaková láhev byla spotřebována během cca 90 taveb. Spotřeba plynu byla rovna:

$$V = \left(\frac{200.50}{1}\right) = 10\,000 \text{ l} \quad (10)$$

Průměrná spotřeba plynu na jednu tavbu vychází:

$$\bar{V} = \left(\frac{10000}{90}\right) \approx 111 \text{ l} \quad (11)$$

Pokud budu opět uvažovat spodní hranici průtoku argonu 5 l/min, spočítám průměrnou dobu argonování jedné tavby:

$$\bar{t} = \left(\frac{111}{5}\right) \approx 22,2 \text{ min} \quad (12)$$

V období od 9. 7. 2015 do 25. 8. 2015 byla průměrná spotřeba argonu téměř 5 krát větší než v uvažovaném období od 1. 10. 2015 do 30. 3. 2016. Příčinou by mohla být nesprávná instalace difuzéru nebo nesprávný pracovní postup tavičů, kteří nehlídali doporučené hodnoty průtoku argonu a jeho tlaku. Hodnoty průtoku ani tlaku se nezaznamenávají. Podle tavičů se však tlak pohyboval v rozmezí od 0,5 až 0,7 barů. To by naznačovalo na únik argonu a znamenalo by to další potíže s ohledem na správné používání celého zařízení.

Vzhledem k výsledkům počtu povrchových vad uvedených výše je velice pravděpodobné, že probublávání taveniny argonem zvyšuje jejich kvalitu (zejména u

odlitků A), nicméně postupem času nebylo tavení prováděno dle doporučení a tím se účinek argonování vytratil. Výsledky mohou být také ovlivněny lidským faktorem.

Při tavení a lití dalších odlitků bych doporučil věnovat pozornost spotřebě argonu a sledovat dále případnou změnu kvality odlitků. K vytvoření jednoznačnějšího závěru bych také doporučil zaznamenávat hodnoty průtoku a tlaku argonu, a zároveň dobu, po kterou byla tavenina probublávána argonem.

## 5.4 Návrhy na změnu technologie

Na základě analýz (provedené v praktické části), které ukázaly zvýšené množství kyslíku i dusíku, a výsledků z probublávání taveniny argonem, jsem začal uvažovat o jiném způsobu ochrany taveniny inertním plynem. Stávající technologie tavení a lití materiálu bez ochrany před okolní atmosférou není vhodná z pohledu vzniku oxidických vměstků.

Prvním návrhem bylo určitým způsobem zajistit krytí povrchu roztaveného kovu inertním plynem tak, aby se vytvořila určitá bariéra mezi taveninou a okolním vzduchem. Při studiu různých zdrojů jsem objevil článek, který se zabýval v principu mým prvním návrhem. Jedná se o metodu LBI, popsanou v teoretické části v *Kap. 2*. Laminární proudění inertního plynu vytvoří ochrannou vrstvu, která výrazně omezí množství kyslíku, které přijde do kontaktu s tekutým kovem. Podobných myšlenek ochrany taveniny bude patrně mnoho, proto jsem po dlouhém hledání objevil ještě jeden zajímavý článek týkající se využití kapalného argonu. Princip a výsledky experimentu jsou taktéž popsány v *Kap. 2*. Pro slévárnu přesného lití Prague Casting Services a.s. by tato varianta byla méně nákladná z toho důvodu, že kryogenní argon se již ve slévárně používá pro svařovnu a vakuové pece. Nebyl by velký problém nainstalovat přívod tekutého argonu k ústí pece. Nicméně bych doporučil kontaktovat firmu, která se konkrétně zabývá ochrannými plyny, jako například firma Air Liquide. Dle mého názoru se tím ušetří čas i náklady na výzkum v porovnání s variantou, kdy by se slévárna pokusila vlastními silami nějaké zařízení zkompletovat. Již zmíněné úspory popisované slévárnou Quality Castings (zejména snížení nákladů na opravy na svařovně a na řezné a brusné nástroje) jsou podstatou této diplomové práce.

V případě využití ochrany taveniny argonem, ať už jakýmkoliv způsobem, by mělo dojít k výraznému zvýšení kvality taveniny. Pokud je tavenina čistší, lze předpokládat lepší slévatelnost, čímž by se mohly upravit teploty lití, snížila by se tvorba strusky, prodloužila životnost pecní vyzdívky, brusných a obráběcích nástrojů, snížil by se propal legur a samotného základního materiálu apod. Ovšem je třeba brát v úvahu také reoxidaci během transportu taveniny v pánvi a při samotném odlévání, která není zanedbatelná. Nelze odhadnout, jaký velký bude vliv reoxidace, proto bych experimentálně doložil pouze vliv ochrany taveniny na kvalitu odlitků a na základě těchto měření bych pokračoval s dalšími případnými návrhy ochrany licí pánve a skořepinové formy. Tyto návrhy jsou již nad rámec této práce.



V souvislosti s vysokým obsahem vměstků z oxidu hliníku, který souvisí s dezoxidací taveniny v pánvi, bych doporučil dodatečnou rafinaci a následné odstranění strusky přímo z pánve těsně před litím.

## 6 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo navrhnout změnu ve stávající technologii výroby, s ohledem na potlačení vad a zvýšení jakosti vybraného typu odlitku, z důvodu vysokých nákladů spjatých s jeho opravami. Především se jedná o vyvažování povrchových vad. Odlitek se vyrábí technologií přesného lití vytavitelným modelem pro energetický průmysl. Je poměrně rozměrný a hmotný. Výchozí materiál se taví v indukční peci a samotné lití probíhá při kontaktu se vzduchem.

Nejprve jsem v této práci popsal technologii přesného lití, do které jsem zahrnul celkový výrobní proces ve slévárně přesného lití Prague Casting Services a.s. a zároveň veškerou teorii související s praktickou částí. Jedná se o rozdělení žáruvzdorných materiálů pro pecní vyzdívky a porovnání dvou nabídek pecních výdusek od různých výrobců, dále jsem popsal interakci mezi tekutým kovem a formou, a také vliv teploty lití. Další dvě kapitoly se věnují ochraně taveniny inertním plynem. První variantou je ochrana taveniny během tavení vytvořením bariéry pomocí laminárního proudění argonu nebo směsi argonu a dusíku mezi roztaveným kovem a okolní atmosférou. Druhá varianta tvoří onu bariéru pomocí kapalného argonu, který ústí v blízkosti pece a odkapává na taveninu. Součástí této kapitoly je navíc souhrn nejběžnějších vad přesných odlitků se zaměřením na vměstky a oxidické blány.

Na poměrně obsáhlou první kapitolu navazuje přehled kovových materiálů pro speciální aplikace. Smyslem této práce není vytvořit podrobný rozbor kovových materiálů, kterých existuje celá řada. Pojem speciální aplikace jsem směřoval do energetického průmyslu. Podrobněji jsem se věnoval pouze vybraným materiálům používaných ve slévárně Prague Casting Services.

Praktickou část zahajují analýzou a vyhodnocením technologičnosti konstrukce odlitku. Vedení slévárny si z důvodu firemního „know-how“ nepřeje zveřejňování konkrétních fotografií nebo výkresů vybraného odlitku, nicméně k pochopení souvislostí spjatých s výskytem vad, jsem pro ilustraci odlitek schematicky vymodeloval a představil velmi obecně problémy plnění formy. Druhou částí kapitoly je popis výchozí technologie indukčního tavení a odlévání na atmosféře, na kterou budu navazovat se svými návrhy změn.

Analýzou výchozí situace ve slévárně a informací nabytých během výrobního procesu a od kolegů v TPV jsem podnikl první krok, kterým byla snaha prokázat výrazný vliv pecní výdusky nebo pánve na kvalitu odlitků. Použitím dat ze svařovny, kde zaznamenávají mapy

závarů, jsem vynesl grafickou závislost počtu bodových závarů, které odpovídají počtu povrchových vad, na jednotlivých odlitcích v průběhu roku 2015. Do grafického výstupu jsem zaznamenal dny, kdy se formovala nová pecní výduska nebo nová pánev. Zcela jistě má kvalita pecní vyzdívky vliv na kvalitu odlitků, nicméně závěr nebyl jednoznačný a přímou závislost se nepodařilo prokázat.

Bylo tedy zapotřebí zjistit hlavní příčinu snížené kvality odlitků. Připravily se metalografické výbrusy nejen zadaného odlitku z materiálu CF3, ale také z jiného typu odlitku z materiálu N155, který se indukčně taví a odlévá také na atmosféře. Z výbrusů se zjistilo poměrně velké zastoupení vměstků v podobě blan. Ve spolupráci s VŠCHT jsem provedl chemickou analýzu vybraných vměstků jak z materiálu CF3 pro zadaný odlitek, tak z materiálu N155, které potvrdily původní předpoklad, a to, že se jedná o vměstky oxidické. Šlo především o oxidy hliníku a křemíku. Hliník se ani v jednom z uvedených materiálů nevyskytuje, ale využívá se jako dezoxidovadlo. Během chemických analýz jednotlivých vměstků jsem se ve spolupráci s Ústavem materiálového inženýrství v Praze pokusil určit obsahy kyslíku a dusíku ve vybraných vzorcích. Měření dusíku proběhlo bez problémů, ovšem kyslík se kvůli citlivosti přístroje podařilo naměřit pouze v jednom ze tří případů. Vzorky se odebíraly z přílitků, sloužících pro chemickou analýzu jednotlivých odlitků, které se během lití zaplňují jako jedna z posledních částí. To naznačuje na větší koncentraci oxidických vměstků, které mohly měření obsahu kyslíku značně ovlivnit. Z toho důvodu se v Enviformu a.s. ve Třinci provedla ověřovací analýza, která nebyla opět jednoznačná. Nicméně s největší pravděpodobností lze vyslovit závěr, že obsahy kyslíku, stejně jako dusíku jsou zvýšené. Dusík se do taveniny může dostat pouze z okolního vzduchu, proto platí předpoklad, že většina, ne-li všechen kyslík se do taveniny dostává stejným způsobem.

Během léta 2015 se začalo experimentovat s probubláváním taveniny argonem. Úkolem této technologie je zajistit vyplouvání vměstků jakéhokoliv původu do strusky, která se následně odstraňuje. Do spodní části kelímku se zadusal difuzér, kterým se do taveniny pouštěl argon. Vyhodnocení jsem rozdělil podle dvou kritérií. Abych byl schopen kvalitu odlitků kvantifikovat, rozdělil jsem odlitky na vyhovující a nevyhovující podle počtu bodových závarů. V létě se navíc k hodnocení zapojovali také svářeči, kteří díky jejich zkušenostem posuzovali také velikost a rozsah napadení. Proto vyhodnocení během léta 2015 nazývám jako subjektivní. Objektivní vyhodnocení zahrnuje širší základnu dat (od 24. 6. 2015 do 30. 3. 2016), kde se vyhovující a nevyhovující odlitky dělí pouze na základě počtu bodových závarů. Subjektivní

hodnocení přineslo zlepšení o 42 % pro můj zadaný odlitek a společně s druhým typem odlitku se výsledná kvalita zvýšila o 20 %. Objektivní varianta hodnocení již tak optimistická nebyla. Pro větší odlitek s označením A byla sice větší úspěšnost s tavením při použití argonu, nicméně celkový efekt se vytratil. Provedl jsem tedy další rozbor situace a spočítal hrubý odhad spotřeby argonu. Výpočet ukázal, že v letním období 2015, kdy se projevovaly kladné dopady použití argonu, byla jeho spotřeba 5 krát vyšší než v období od 1. 10. 2015 do 30. 3. 2016. Lze tedy soudit, že argon má pozitivní vliv na ochranu taveniny a problém spočíval v nesprávném pracovním postupu ze strany licího pole a nedbalé kontroly. Pokud by se pokračovalo v této technologii, navrhl bych sledovat a zaznamenávat průtok argonu, tlak a dobu, po kterou se tavenina inertním plynem probublávala. Tím lze získat přesnější data ke kontrole a vyhodnocení efektu probublávání taveniny argonem.

Na základě analýz a provedeného experimentu s probubláváním taveniny argonem jsem dále začal uvažovat, jakou cestou se ubírat v řešení problému snížené jakosti odlitků. Jelikož se materiál indukčně taví a odlévá na atmosféře, první myšlenkou byla izolace taveniny od okolního prostředí. Pravděpodobně nejvhodnějším řešením by bylo chránit taveninu inertním plynem – argonem. Jelikož materiál není určený pro tavení pod vakuem, existuje tedy možnost vytvoření určité plynové bariéry mezi taveninou a vzduchem. Prostudováním různých zdrojů jsem se dostal ke dvěma variantám, které ve své práci zmiňuji z důvodu možné aplikace ve slévárně Prague Casting Services. Výsledky obou metod jsou v podstatě podobné, rozdíl je v postupu.

V první řadě se jedná o metodu LBI (Laminar Barrier Inerting), jejíž podstatou je chránit taveninu laminárním prouděním inertního plynu během indukčního tavení materiálu. Výsledkem je schopnost této technologie udržet obsah kyslíku těsně nad taveninou až pod 1 % (obsah kyslíku v atmosféře se pohybuje kolem 21 %). Experimentem bylo zjištěno snížení obsahu kyslíku v tavenině o 30 až 60 %. Tím se dosahuje snížené tvorby strusky, tavenina je čistší a celková kvalita odlitků potom vyšší.

Druhou variantou je metoda využívající kapalného argonu, který ústí nad indukční pec a kryogenní plyn odkapává na povrch taveniny. Během vypaření se jeho objem zvýší 840 krát, a protože je těžší než okolní vzduch, zůstává nad hladinou. Omezením reakce mezi taveninou a atmosférou se sníží tvorba strusky. Čistší tavenina:

- snižuje potřebný čas na tavení,

- vede k lepší slévateľnosti, především pak k zabíhavosti, tudíž lze snížit teploty lití bez rizika, že nedojde k zaběhnutí formy,
- vede k eliminaci vměstků vznikajících z pecní vyzdívky a oxidací taveniny,
- vede k eliminaci pórovitosti a zavalenin,
- zvyšuje životnost pecní vyzdívky,
- usnadňuje oddělování vtokové soustavy,
- zvyšuje životnost brusných a obráběcích nástrojů,
- snižuje náklady na opravy odlitků

Patentovanou technologii SPAL™ od společnosti Air Liquide U.S. LP, fungující na principu ochrany taveniny tekutým argonem, využívají ve slévárně přesného lití Quality Castings, LLC ve Wisconsinu a jejich výsledky uvedené výše jsou v podstatě cílem této práce. Podle stránek výrobce vše nasvědčuje tomu, že výrobní postup je podobný slévárně v Praze. Tím mám na mysli způsob transportu taveniny přes pánev do formy. Podle mého názoru je varianta použití kryogenního argonu nejvhodnější pro slévárnu Prague Casting Services. Kapalný argon se již ve slévárně využívá. Ze zásobníku se přivádí kryogenní argon na svařovnu a do vakuových pecí. V případě realizace by stačilo pouze nainstalovat přívod k indukční peci. Nicméně nemám představu o velikosti dostatečného průtoku inertního plynu, který by byl schopný taveninu efektivně chránit. Následoval by experiment, nebo by bylo potřeba požádat o konzultaci firmu zabývající se konkrétně ochranou taveniny inertními plyny.

V závěru bych chtěl jen shrnout stávající situaci a dodat některé důležité informace. Doporučil bych slévárně přesného lití Prague Casting Services zvážit ochranu taveniny nejprve tekutým argonem, metodou LBI nebo jinou eventuální technologií. V odlitcích se nachází velké množství oxidických vměstků v podobě blan, které vlivem vysoké viskozity a převládajícím plošnému rozměru vytvářejí často rozsáhlé shluky na povrchu i uvnitř odlitku. Překvapením z analýz vměstků bylo vysoké zastoupení hliníku a křemíku, proto by se mohlo vyzkoušet jiné dezoxidovadlo (např. SiTi nebo FeSiCa). Možná by byla také dodatečná rafinace a odstranění strusky přímo z pánve těsně před litím. Při doporučení použití kapalného argonu vycházím především ze závěrů slévárny Quality Castings, LLC, jejichž výrobní proces se zdá být obdobný slévárně Prague Casting Services. Zdůrazňuji to proto, že velkou roli bude pravděpodobně hrát také sekundární a terciální reoxidace, která počíná přelitím taveniny do pánve a končí ztuhnutím odlitku. Vliv množství taveniny, teploty lití, způsobu zaplňování formy a především doba vystavení taveniny okolnímu prostředí, je nezanedbatelný. Jistým řešením eliminace

tohoto vlivu by byl návrh mechanismu, který by umožňoval odlévat odlitky přímo z pece, například přes vhodně zkonstruovaný žlábek, nebo argonem chránit taveninu zároveň během transportu v pánvi a při odlévání. Nicméně tento návrh už je nad rámec této práce. Doporučuji nejprve chránit taveninu během tavení před okolní atmosférou, dbát na absolutně vysušenou vsázku, vyžíhané, suché nástroje na manipulaci s taveninou a na základě výsledků rozhodnout o dalším postupu.

## 7 Seznam použitých zdrojů

[1] DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlitků*. Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1976.

[2] Investment Casting Process. *Ningbo Tiancheng non-ferrous metal products CO.,LTD*. [online]. [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <http://www.cheng-casting.com/investment-casting-precess.htm>

[3] SOUKUPOVÁ, Lucie. *TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI* [online]. BRNO, 2011 [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39058](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39058)

[4] Metoda kapilární. *Controltest s.r.o.* [online]. [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/kapilarni.php>

[5] Kapilární metody (PT). *NDT servis* [online]. [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <http://www.ndtservis.cz/web/index.php/cz/nedestruktivni-zkouseni/kapilarni-metody-pt>

[6] *Zkoušky bez porušení materiálu* [online]. In: . [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: [http://www.ssebrno.cz/files/ovmt/kapilarni\\_zkousky.pdf](http://www.ssebrno.cz/files/ovmt/kapilarni_zkousky.pdf)

[7] HEMALA, Robert. *SYSTÉM NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLY VE SLÉVÁRNĚ OCELOVÝCH ODLITKŮ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54829](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54829)

[8] Zhutňování odlitků. *Bodycote* [online]. [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/hot-isostatic-pressing/isostatic-pressing-services/casting-densification.aspx>

[9] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Lenka MRŇKOVÁ. *Průmyslové pece* [online]. In: . Ostrava, 2013 [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: [http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/prumyslove-pece/Machackova\\_Prumyslove-pece.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/prumyslove-pece/Machackova_Prumyslove-pece.pdf)

[10] *Žáruvzdorné materiály a výrobky* [online]. In: . [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: [http://www.spsstavcb.cz/download2/633\\_2428\\_cs\\_09\\_zaruvzdorne\\_materialy\\_a\\_vyrobky.pdf](http://www.spsstavcb.cz/download2/633_2428_cs_09_zaruvzdorne_materialy_a_vyrobky.pdf)

- [11] Refractory Materials for Furnaces and Kilns. *Keith: High Temperature Thermal Processing Systems*[online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.keithcompany.com/refractory-materials-for-furnaces-and-kilns.html>
- [12] Prodej zařízení a technické poradenské služby pro slévárny. *ACESO Praha* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.aceso.cz/>
- [13] *Capital Refractories s.r.o.* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.edb.cz/firma-374478-capital-refractories-senov>
- [16] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [21] LEVÍČEK, Petr a Karel STRÁNSKÝ. *Metalurgické vady ocelových odlitků: (příčiny a odstraňování)*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [22] SHARMA, S. K. a M. S. NOWOTARSKI. Laminar Barrier Inerting for Induction Melting [online]. , 13 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.praxair.com/~media/praxairus/documents/reports%20papers%20case%20studies%20and%20presentations/industries/metal%20production/paper%201989%20lbi%20for%20induction%20furnaces%20sharma.pdf>
- [23] HARRINGTON, Randy. Benefits of Liquide Argon Shield in Induction Melting With SPALTM Technology. In: *Investment Casting Institute: 57th Annual Technical Conference & Equipment Expo Covington*. Kentucky, 2010, s. 8.
- [24] DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlitků*. Praha 1: Nakladatelství technické literatury, 1976.
- [25] OTÁHAL, Vlastislav. *Vady odlitků: Atlas Vad* [online]. Brno, , 40 [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: [http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady\\_odlitku\\_vytah.pdf](http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady_odlitku_vytah.pdf)
- [26] BOLIBRUCHOVÁ, Dana, Marek BRŮNA a Vladimír MAGÁT. Chyby odliatkov odlievaných technologií na vytavitelný model: Defects of casting made by Investment casting technology. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008, LVI.(9-10), 4. ISSN 0037-6825.



- [27] OTÁHAL, Vlastislav. *Vměstky (makrovměstky – mikrovměstky) v odlitcích ze železných slitin: Atlas Vměstků (oceli – litiny)* [online]. Brno, , 26 [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: [http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vmestky\\_makro-mikro\\_vytah.pdf](http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vmestky_makro-mikro_vytah.pdf)
- [28] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Petr JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.
- [29] Heat Resistant Steel. *Champak Industries: A CSEC Group Company* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.champakgroup.com/heat-resistant-steel.html>
- [30] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [31] The metal solution. *MTC: Metal Technology Co.,Ltd.* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.kinzoku.co.jp/english/eng/images/img36b.gif>
- [32] BHADESHIA, H. K. D. H. *High Performance Bainitic Steels* [online]. In: . [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.161.3770&rep=rep1&type=pdf>
- [33] Martensitic Stainless Steels. *BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION: Making the Most of Stainless Steel*[online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=253>
- [34] High temperature austenitic grades. *Outokumpu* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.outokumpu.com/en/products-properties/more-stainless/stainless-steel-types/heat-resistant/pages/default.aspx>
- [35] Corrosion & Heat Resistant Nickel Alloys (10086). *Nickel Institute: knowledge for a brigter future* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: [https://www.nickelinstitute.org/en/TechnicalLiterature/Technical%20Series/CorrosionAndHeatResistantNickelAlloys\\_10086\\_.aspx](https://www.nickelinstitute.org/en/TechnicalLiterature/Technical%20Series/CorrosionAndHeatResistantNickelAlloys_10086_.aspx)
- [36] BENEŠ, Libor. *Vysokoteplotní slitiny: Slitiny niklu. Slitiny kobaltu*. [online]. In: . [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: [users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/06\\_Vysokoteplotni%20slitiny.ppt](users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/06_Vysokoteplotni%20slitiny.ppt)

- [37] EN 1.4301, AISI 304 EN 1.4307, AISI 304L. In: *Outokumpu* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: [http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Stainless-Steel-1.4304-1.4307\\_Datasheet.pdf](http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Stainless-Steel-1.4304-1.4307_Datasheet.pdf)
- [38] Swimming pool ladders in AISI-304 and AISI-316. *SDS Engineering* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.sds-group.com/products/swimming-pool-ladders-aisi-304-and-aisi-316>
- [39] ASTM A182 Stainless steel flanges. *Metline Industries* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.sds-group.com/products/swimming-pool-ladders-aisi-304-and-aisi-316>
- [41] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI. *Italinox: Nová dimenze ve světě nerezové oceli* [online]. [cit. 2016-07-10]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>
- [42] SPECIFIKACE NEREZOVÝCH MATERIÁLŮ. In: *Armat spol. s.r.o.: Made of Stainless ..* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [43] AISI Type 304L Stainless Steel. In: *ASM: Aerospace Specification Metals Inc.* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304L>
- [44] N-155 (MULTIMET) TECHNICAL DATA. In: *High Temp Metals* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempN155data.php>
- [45] Alloy Multimet N155 (AMS 5532 / AMS 5769). *Aircraft Materials* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/n155.html>
- [47] TURBALOY® 155: HQ-GRADE, GTAW SOLID BARE WELDING WIRE, IRON BASE. In: *USW: United States Welding Corporation* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.usweldingcorp.com/TDS/tds5794.pdf>
- [48] Super Alloy Alloy 155. *Metal Suppliers online* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.suppliersonline.com/propertypages/alloy155.asp#General>

- [49] Alloy IN-738: Alloy IN-738 Technical data. In: [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [http://www.nipera.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/IN\\_738Alloy\\_PreliminaryData\\_497\\_.pdf](http://www.nipera.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/IN_738Alloy_PreliminaryData_497_.pdf)
- [50] INCONEL™ 738: FORGING FACTS & CHARACTERISTICS. *All Metals & Forge Group* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <http://www.steelforge.com/inconel-738/>
- [51] PRAGUECAST. Slévárna přesného lití metodou vytavitelného modelu [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [http://www.praguecast.cz/cz/gallery\\_aerospace.php](http://www.praguecast.cz/cz/gallery_aerospace.php)
- [52] ŠMÍD, Miroslav. STANOVENÍ ZKRÁCENÝCH CYKLICKÝCH DEFORMAČNÍCH KŘÍVEK SUPERSLITINY INCONEL 738LC PŘI ZVÝŠENÝCH TEPLOTÁCH [online]. Brno, 2008 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7056](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7056)
- [53] Inconel 713 718LC 738LC vacuum casting for metal. *Alibaba.com: Global trade starts here* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Inconel-713-718LC-738LC-vacuum-casting\\_1761030256.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Inconel-713-718LC-738LC-vacuum-casting_1761030256.html)
- [54] *METALURGIE SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN* [online]. HAMPL, Jiří. Ostrava, 2013, s. 85 [cit. 2016-07-11]. ISBN 978-80-248-3357-6. Dostupné z: [http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/09\\_Metalurgie\\_slevarenskych\\_slitin/Hampl\\_Metalurgie\\_slevarenskych\\_slitin.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf)
- [55] High Performance Oxygen, Nitrogen and Hydrogen Analyzer. *Bruker* [online]. [cit. 2016-07-11]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/csonh-analysis/g8-galileo-onh/overview.html?print=1>
- [57] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [58] *Investment Casting Design Parameters*. In: . The Investment Casting Institute, s. 8.

## 8 Interní specifikace a předpisy

[14] *Technický a pracovní postup – Postup výroby kelímku pro indukční pec ACEC 100*. Prague Casting Services a.s., 2013. Výchozí materiály a jejich specifikace.

[15] *Product Bulletin*. Allied Mineral Products, Inc., 2012. DRI-VIBE® 883A

[17] *Technický a pracovní postup – Příprava primárních a sekundárních břeček*. Prague Casting Services a.s., 2012. Složení břeček.

[18] *Technický a pracovní postup – Vlastnosti koloidního křemičitého pojiva Primcote*. Prague Casting Services a.s., 2010. Vlastnosti.

[19] *Technický a pracovní postup – Vlastnosti hlinitanu kobaltnatého*. Prague Casting Services a.s., 2010. Vlastnosti.

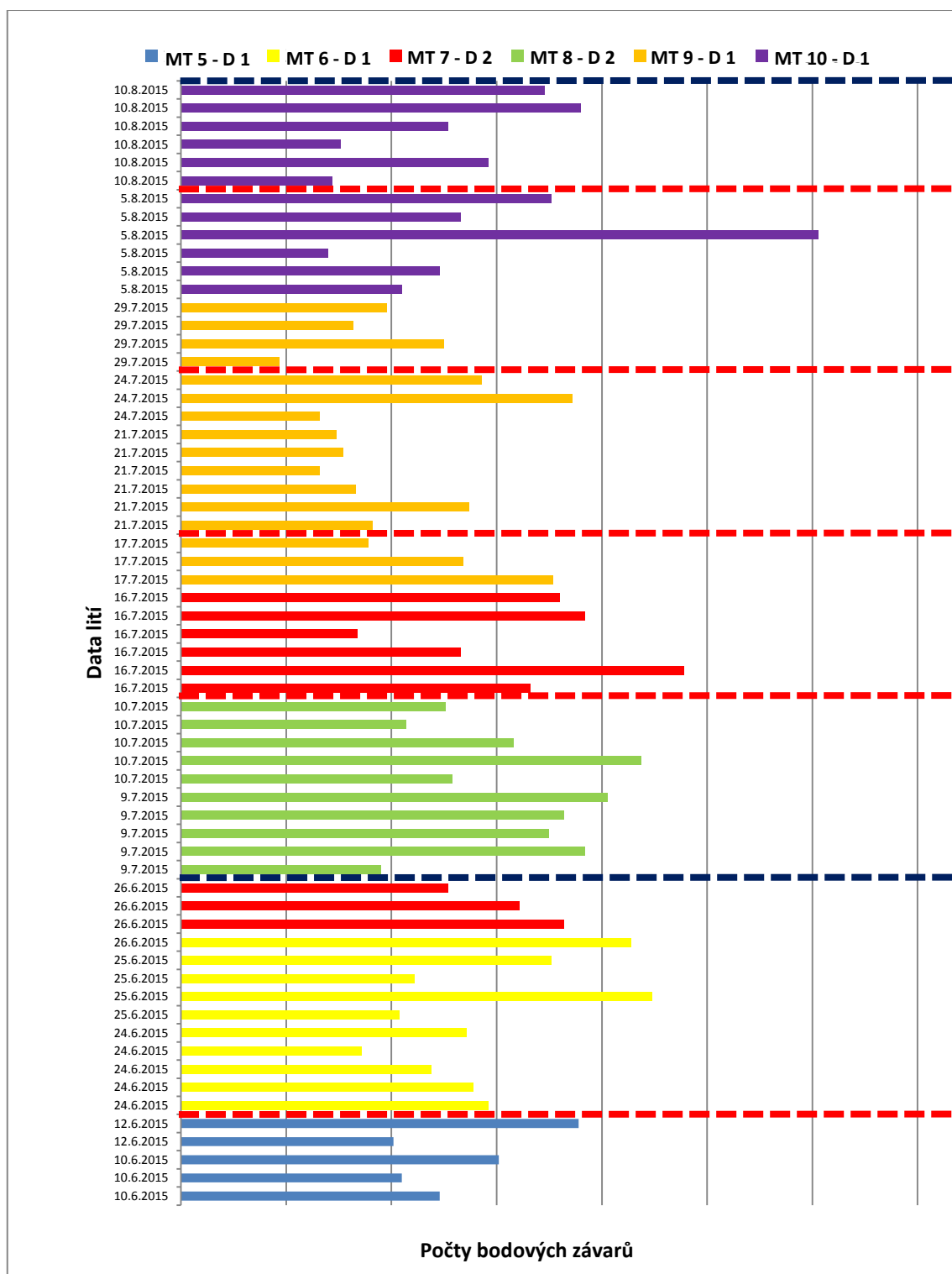
[20] *Technický a pracovní postup – Vlastnosti zirkonu*. Prague Casting Services a.s., 2010. Vlastnosti.

[40] *Material Specification Stainless Steel Castings - Chemical Analysis*. Westinghouse, 2010. AA 302 260, Page 5.

[46] *Certificate of conformity & analysis*. ABS Alloys & Metals, 2014. N155 Ingot.

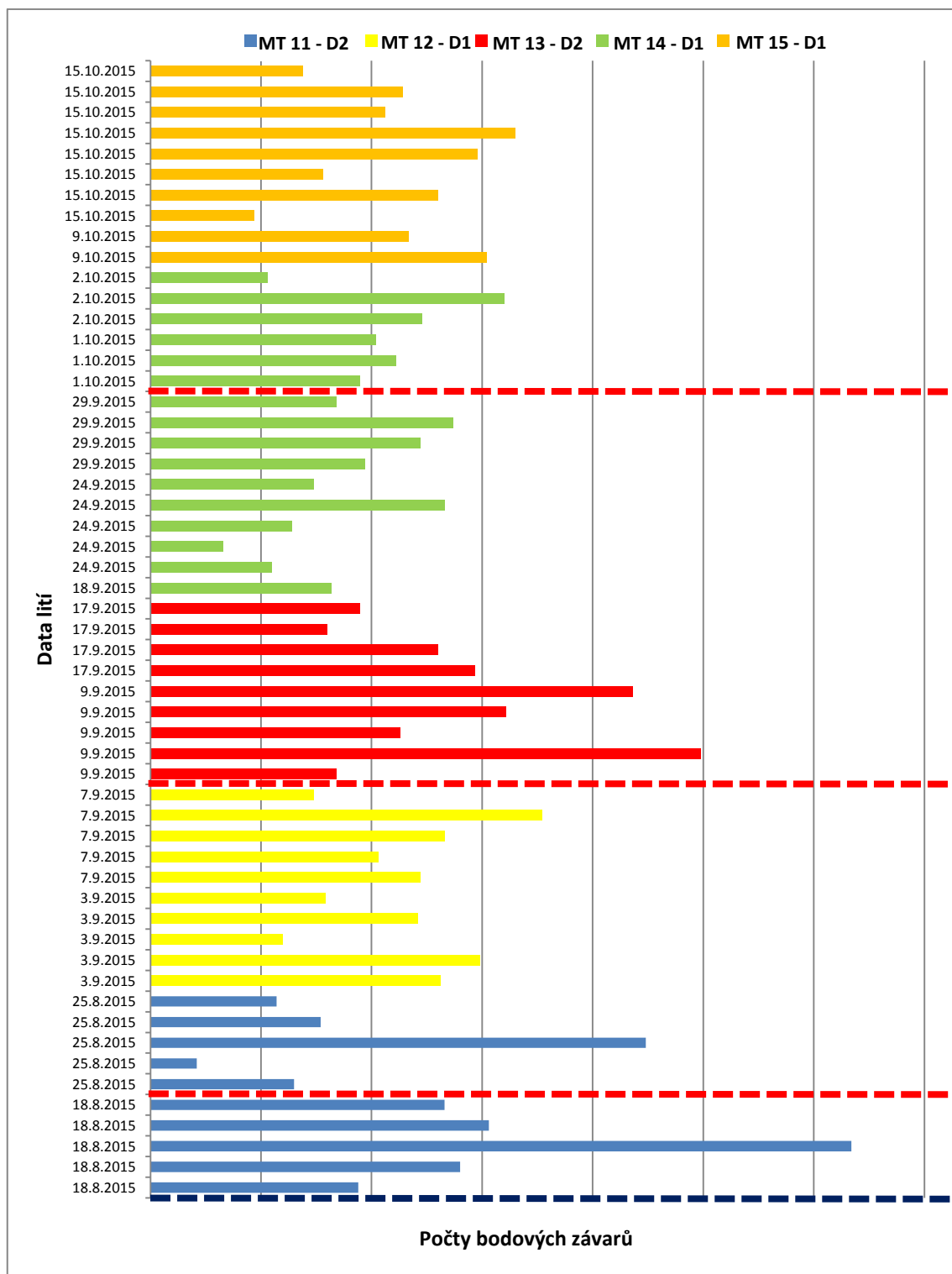
[56] *Technický a pracovní postup – Plynový difuzér – Vlastnosti a použití*. Prague Casting Services a.s., 2015.

# 9 Přílohy



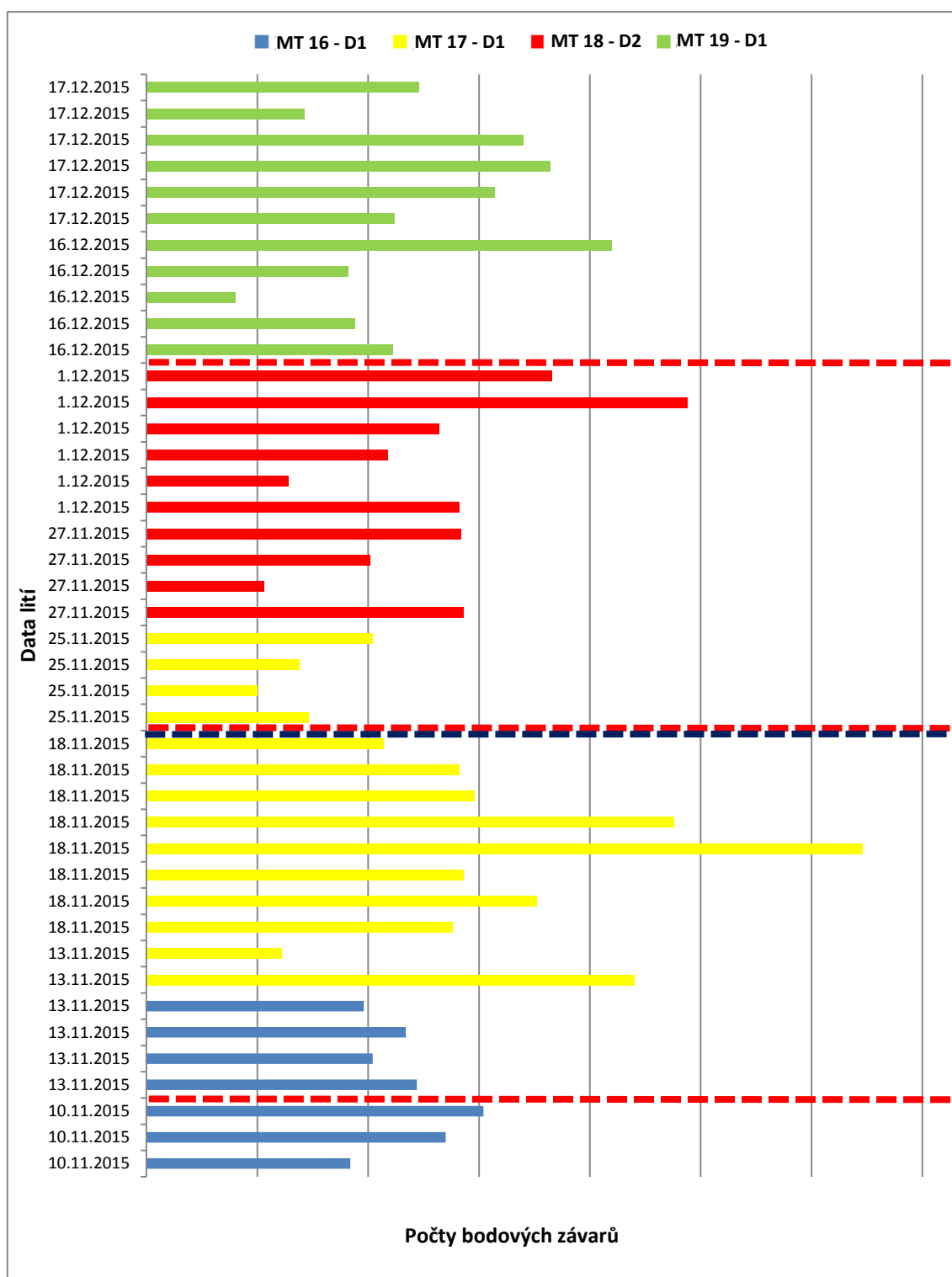
Graf 17: Časová závislost bodových závárů pro jednotlivé odlitky

(Poznámka: MT = Mateřská tavba, D = Dodavatel)



Graf 18: Časová závislost počtu bodových závadů pro jednotlivé odlitky

(Poznámka: MT = Mateřská tavba, D = Dodavatel)



Graf 19: Časová závislost bodových závarů pro jednotlivé odlitky

(Poznámka: MT = Mateřská tavba, D = Dodavatel)