Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Optimalizace odplyňovacího procesu ve slévárně

Optimization of the Degassing Process in a Foundry

Student: Bc. Jan Večeřa

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimíra Schindlerová, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student:	**Bc. Jan Večeřa**
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2303T002 Strojírenská technologie
Specializace:	10 Technologický management
Téma:	Optimalizace odplyňovacího procesu ve slévárně Optimization of the Degassing Process in a Foundry
Jazyk vypracování:	čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická východiska zadané problematiky.
2. Analýza současného stavu.
3. Experimenty a vyhodnocení získaných poznatků.
4. Implementace navrženého řešení.
5. Zhodnocení optimalizace a přínos pro podnik.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN ISO 690 (01 0197) *Informace a dokumentace: Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů.* Praha: ÚNMZ, 2011, 40 s.
HLAVENKA, B. *Projektování výrobních systémů: technologické projekty.* 3. vyd. Brno : CERM, 2005.197s. ISBN 80-214-2871-6.
NOVÁK, J., ŠLAMPOVÁ, P. *Racionalizace výroby.* VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2007. 75 s. CZ.04.1.03/3.2.15.3/0414.
KEŘKOVSKÝ, M. *Moderní přístupy k řízení výroby.* Vyd. 2. Praha: C. H. Beck, 2009. 137 s. ISBN 978-80-740-0119-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimíra Schindlerová, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Dostál

Datum zadání: 08.12.2017
Datum odevzdání: 21.05.2018

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA Fakulta strojní -5- OSTRAVA

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2018 …………………

………………………………

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2018 ……………………………………

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Večeřa

Adresa trvalého pobytu autora práce: Václavovická 828, Šenov 739 34

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VEČEŘA, J. *Optimalizace odplyňovacího procesu ve slévárně: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2018, 56 s. Vedoucí práce: Schindlerová, V.

Diplomová práce byla vypracována ve společnosti Brembo Czech s.r.o. a zaměřuje se na dosažení optimálního nastavení technologického procesu odplynění slitiny hliníku ve stavu taveniny, která je následně v rámci společnosti využívána k výrobě podvozkových komponentů osobních automobilů. V první části diplomové práce jsou shrnuty teoretické základy k řešené problematice, na které v části druhé navazuje analýza současného stavu procesu, návrh a provedení experimentů, jejich vyhodnocení, aplikace optimálního nastavení a zhodnocení efektu pro výrobní proces.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VEČEŘA, J.*Optimization of the Degassing Process in a foundry: diploma thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2018, 56 p. Thesis head: Schindlerová, V.

The Diploma thesis was done in corporation with company Brembo Czech s.r.o. and is focused on optimal setting of technological process for degassing aluminum alloy in melted state, which is then used for personal vehicles chassis components production. In the first part of Diploma thesis is summary of theoretical basics related to the solved problematic followed by second part which contains of current situation analysis, proposal and execution of experiments, their evaluation, optimal setting application and final effect on production process.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů ... 7
Úvod ... 8
1 Teoretická východiska zadané problematiky ... 9
1.1 Výrobní proces ... 9
1.2 Plánování experimentů (DOE) ... 13
1.3 Slévárenství ... 14
1.4 Lití hliníku ... 17
1.5 Příprava taveniny ... 20
Druhy tavících pecí ... 20
1.6 Odplynění taveniny ... 22
1.7 Měření naplynění taveniny ... 27
Charakteristika podniku Brembo Czech s.r.o. ... 30
2 Analýza současného stavu ... 32
2.1 Popis odplyňovací jednotky ... 33
2.2 Odplyňovací cyklus ... 34
2.3 Měření parametrů taveniny ... 35
2.4 Shrnutí současného stavu ... 39
3 Experimenty a vyhodnocení získaných poznatků ... 40
3.1 Plánování experimentů ... 40
3.2 Provedení experimentů ... 41
3.3 Vyhodnocení experimentů ... 45
4 Přínosy pro podnik a implementace ... 49
5 Závěr ... 51
Seznam použité literatury ... 52
Seznam obrázků a tabulek ... 54

Seznam použitých zkratek a symbolů

$m_{vz\ at}$	hmotnost vzorku ve vzduchu	[kg]
$m_{vz_{H2O}}$	hmotnost vzorku ve vodě	[kg]
ρ_{vz}	hustota vzorku	[kg*m^{-3}]
$\rho_{vz\ atm}$	hustota vzorku ve vzduchu	[kg*m^{-3}]
$\rho_{vz\ vak}$	hustota vzorku ve vakuu	[kg*m^{-3}]
ρ_{H2O}	hustota vody	[kg*m^{-3}]
BMW	Automobilka BMW (Bayerische Motoren Werke)	
DI	Dichte index	[%]
DOE	Plánování experimentu (Design of experiment)	
F1	Formule 1	
GM	Automobilka GM (General Motors)	
IATF	International automotive task force	
PDCA	Plánuj – Udělej – Zkontroluj – Jednej (Plan – Do – Check – Act)	
S.p.A.	Akciová společnost (Società per Azioni)	
VZV	Vysokozdvižný vozík	
V_{vz}	objem vzorku	[m^3]

Úvod

Je stále složitější se v dnešní době udržet na špičce jakéhokoliv oboru. Ať už jde o malého lokálního podnikatele, nebo celosvětově působící společnost, oba musí mít neustále na paměti, že se trh dynamicky rozvíjí a je velice snadné přijít o svou těžce získanou pozici. Z jedné strany se vytrvale snaží prosadit konkurenční společnosti, které je nutné neustále sledovat a ze strany druhé může přijít nečekaná překážka třeba ve formě omezení podnikání z důvodu změny politické situace na cílových trzích.

Naprosto klíčovým se dnes stává udržení konkurenceschopnosti trvalým rozvojem všech aspektů v podnikání. Naštěstí není nutné vše vymýšlet úplně od začátku, existuje celá řada známých a léty osvědčených metod, jejichž pouhou aplikací a udržením lze docílit značné výhody. Některé z nich jsou dnes dokonce pevně zakořeněny v normách a tím se stávají téměř povinné. Jedná se především o závazná pravidla pro organizaci a řízení procesů v podnicích, ale v neposlední řadě také o nutnost implementace tzv. trvalého zlepšování.

Oblastí, ve které jsou nároky na trvalé zlepšování obzvlášť patrné, je automobilový průmysl. Stále platí, že v rámci České Republiky je právě tento průmysl suverénně nejrozšířenější a i přes citelné rozložení trhu mezi historicky tradiční dodavatele je třeba dbát na pokrok třeba kvůli trvale se zvyšujícím nárokům norem. Naposledy s sebou přineslo výrazné změny vydání normy IATF 16949:2016.

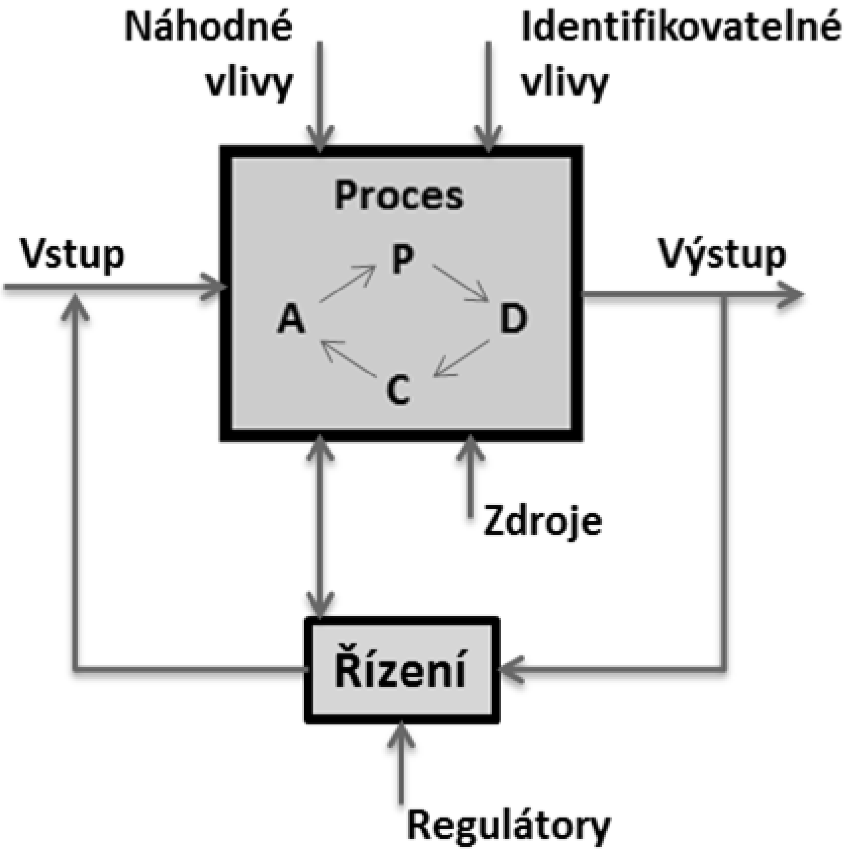
Tato diplomová práce je vytvořena ve spolupráci se společností Brembo Czech s.r.o., což je dceřiná divize nadnárodní korporace Brembo, dnes již tradičního dodavatele především brzdových a podvozkových součástí do automobilového průmyslu. Předmětem práce je analýza zadaného procesu odplynění taveniny hliníku a provedení experimentálních měření za účelem nalezení optimálního nastavení s prokazatelnou úsporou.

1 Teoretická východiska zadané problematiky

Obsahem první části práce je teoretické shrnutí řešené problematiky a zevrubné vysvětlení základních teorií a pojmů, které tvoří základ pro pozdější analýzu a popis procesu v praktické části.

1.1 Výrobní proces

Základním kamenem pro každý výrobní podnik je samotná výroba skládající se z mnoha na sebe navazujících výrobních procesů. Samotný výrobní proces lze poměrně jednoduše definovat jako přeměnu vstupních materiálů, či surovin na požadovaný výstupní produkt. Je však nutné vzít v úvahu množství faktorů, které tuto přeměnu přímo ovlivňují. [1]



Obrázek 1 Výrobní proces [2]

Základní proces jako přeměna vstupů z levé strany na výstupy na pravé straně je zde přímo ovlivněn faktory, jako jsou zdroje v podobě lidských, nebo peněžních zdrojů společnosti, náhodnými vlivy, které nelze dopředu předvídat, což mohou být například přírodní katastrofy, nebo identifikovatelnými vlivy, kupříkladu technický stav výrobních zařízení. Velice důležitou roli v procesu zastává řízení. Už z obrázku 1 je patrné, že má

řízení vazby na více bloků. Jsme totiž schopni přímo řídit vstupy a samotný proces, ale rovněž chování procesu ovlivňuje i styl řízení (jinými slovy je nutné přizpůsobovat řízení signálům z procesu). Dalšími faktory ovlivňující řízení jsou konečné výstupy z procesu (v praxi se běžně přizpůsobuje styl řízení na základě zpětné vazby ze strany zákazníků) a vnější regulátory, tedy například zákony dané země. [1]

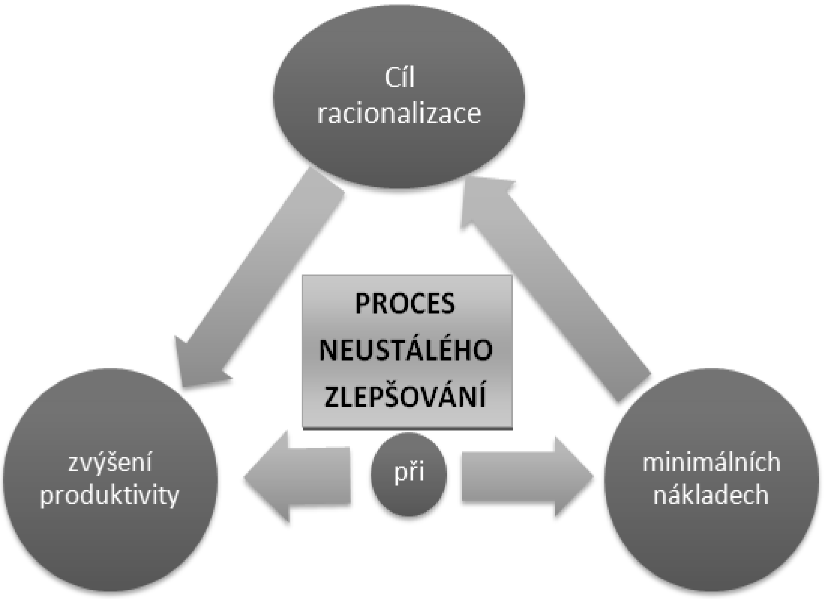
Poslední důležitou informací z přiloženého schématu je koloběh uvnitř procesu popsán jako P, D, C, A. V rámci organizace a řízení podniků se jedná již o notoricky známou zkratku symbolizující PLAN, DO, CHECK, ACT. Jedná se o metodiku nekonečného cyklu definování, provádění a zpětné kontroly řídících akcí za účelem zlepšení, či stabilizace procesu. [2]

Optimalizace

Pojem optimalizace lze definovat mnoha různými způsoby. Vzhledem k širokému využití napříč všemi známými obory není úplně jednoduché najít jednu konkrétní definici. V oblasti obchodu by šlo například optimalizovat portfolio sortimentu za účelem odstranění přebytečných, nákladných a nevýdělečných produktů a zároveň posílení těch produktů, které jsou na základě analýzy trhu pro koncového zákazníka atraktivní. Z předchozího textu by tedy šlo optimalizaci popsat jako výběr ideální varianty z dané množiny. Optimalizace vztažená na již vysvětlený výrobní proces by mohla být kupříkladu definována jako snaha o co nejefektivnější přeměnu zdrojů na produkt a tím i zvýšení výnosnosti daného procesu.

Racionalizace

Vzhledem k obecnosti optimalizace se v průmyslové praxi často nahrazuje pojmem racionalizace. Ve své podstatě jsou tyto dva výrazy synonymem, ale v průběhu času se zažilo několik frází, které jsou přímo spojeny se zlepšováním výrobních procesů, technologií a myšlenkových přístupů k řízení a organizaci. Základním principem racionalizace je udržet nepřetržité zlepšování produktivity za cenu minimálních, nebo alespoň návratných investic (Obrázek 2).



Obrázek 2 Princip racionalizace [2]

Nástroje racionalizace

Pro úspěšnou aplikaci principu racionalizace existuje několik hlavních aspektů, na které se lze zaměřit:

- zlepšení vykonávání pracovních operací,
- uspořádání pracoviště,
- ergonomické standardy pracoviště,
- konstrukční technologičnost,
- technické úpravy pracoviště.

Postup racionalizace

K racionalizaci se vyplatí přistupovat jako k samostatnému projektu, pro který je vhodné si na začátku stanovit pevná pravidla a dodržet určitou strukturu v postupu řešení problému. Typické rozdělení jednotlivých kroků by mělo vypadat následovně.

1. Detailní analýza současného stavu.
2. Posouzení zjištěných informací a určení slabých míst.
3. Návrh jednoho, nebo více optimalizačních možností.
4. Realizace nejvhodnějšího postupu.
5. Závěrečné zhodnocení situace.

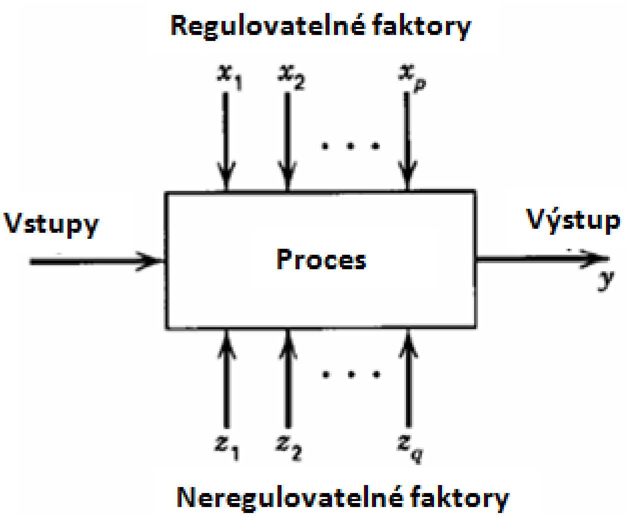
Přístupy k racionalizaci

Kromě výše zmíněných nástrojů racionalizace a definování vhodného postupu se může hodit rozšíření znalostí o možném rozsahu racionalizace a tím i specifickým přístupům k řešení.

a) **Komponentní přístup** – základní možný přístup k racionalizaci. V rámci celku se v jednu chvíli řeší pouze dílčí část systému. Je možné se zaměřit pouze na vybraný funkční prvek technologie, nebo jednoduchou optimalizaci pracovního postupu z pohledu obsluhy. Výhodou těchto řešení je menší časová náročnost a celková jednoduchost implementace. Nevýhodou bývá relativně nízká efektivita.
b) **Komplexní přístup** – v případě komplexního přístupu je vynaložena snaha o zohlednění více pohledů na řešený objekt. Předmětem optimalizace není pouze funkční část technologie, ale rovněž třeba technologičnost konstrukce výrobku za účelem zjednodušení výrobního procesu a také ekonomický rozbor situace. Výsledkem je aplikace racionalizačního opatření založená na souhrnu těchto pohledů.
c) **Systémový přístup** – posledním přístupem se rozumí především rozšíření pole působnosti také o vzájemné vazby s okolím. Takovou implementací lze dosáhnout velmi efektivních řešení, ale za cenu vyšší náročnosti vyžadující hlubší znalosti problematiky i důkladnou přípravu racionalizace jako systémového projektu. [2]

1.2 Plánování experimentů (DOE)

Užitečným nástrojem pro optimalizaci procesů je plánování experimentů (anglicky design of experiments, známější pod zkratkou DOE), díky kterému je možné detailně rozplánovat a studovat chování procesu v závislosti na změnách různých faktorů. (obrázek 3).



Obrázek 3 Schéma DOE [3]

Obdobně, jako již byl popsán výrobní proces výše, i na obrázku 3 je princip DOE vztažen obecně k procesu. Základním principem a cílem metody je nalézt funkční vztahy a závislosti mezi faktory ovlivňující tento proces. Může se jednat jak o faktory, které máme možnost regulovat (na obrázku veličiny x_1, x_2… xp), tak o nekontrolovatelné faktory (na obrázku veličiny z_1,z_2… zq). Dá se tedy říci, že výstup „y“ je roven přeměně vstupů za působení zmíněných vlivů a konečným cílem je zjištění, který z faktorů, nebo kombinace faktorů mají klíčový vliv na výsledek „y“.

Rozsah a náročnost teorií k řešení je přímo úměrný počtu faktorů a jejich úrovním. Pro jednoduchý příklad lze uvést situaci, kdy je zkoumaný proces ovlivněn dvěma faktory, pro který určíme dvě úrovně. Mějme teplotu (faktor x) a rychlost (faktor z). Průzkum chování bude zahrnovat jejich následující kombinatoriku:

- x_1 z_1
- x_1 z_2
- x_2 z_1
- x_2 z_2

Je tedy zřejmé, že s dalšími faktory a úrovněmi budou experimenty růst geometrickou řadou, jejíž kombinaci není možné v podnikové praxi řešit v plném rozsahu. [4]

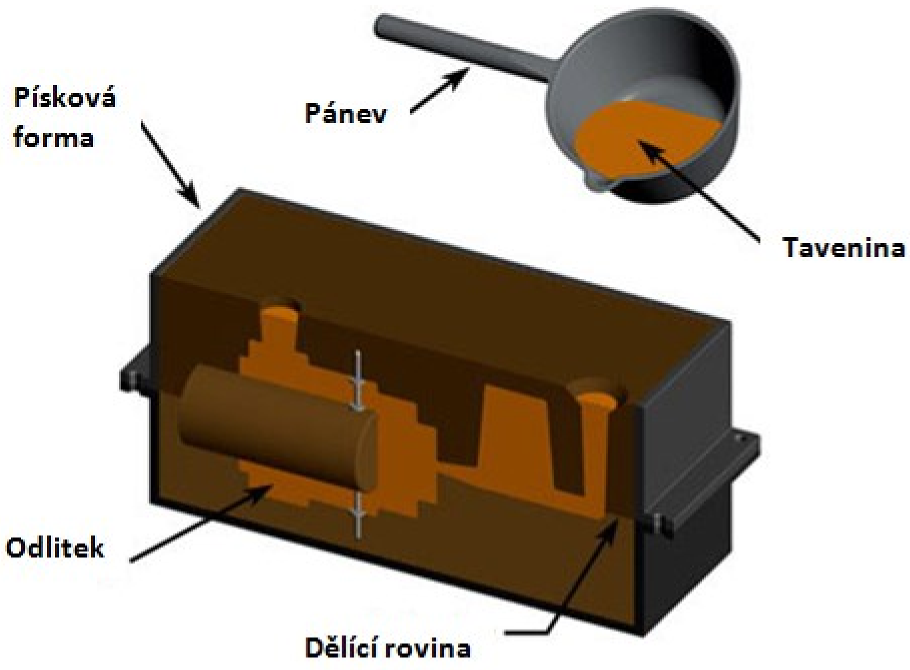
V takových případech lze tuto metodu rozvinout dále a omezit rozsah např. pomoci tzv. Taguchiho tabulek. Pro účely této práce je ale důležité se zaměřit spíše na základní principy experimentálních procedur.

a) **Plánování experimentů** – stěžejní bod na začátku každého experimentu. Vymezení všech potřebných vstupů pro návrh, ovlivňujících faktorů, počty úrovní a jejich nastavení.
b) **Navrhování experimentů** – sestavení logické posloupnosti řešení (v případě složitějších experimentů i dostatečné omezení vzorků dat).
c) **Provedení experimentů** – samotná realizace pokusů s různým nastavením faktorů a sběr dat.
d) **Analýzy a závěr experimentů** – vyhodnocení účinků jednotlivých nastavení faktorů a stanovení optimálních podmínek.
e) **Ověřovací testy** - nedílná součást metody pro ověření, zda jsou zvolené podmínky správné. [5]

1.3 Slévárenství

Slévání je proces, během kterého dochází k odlití roztaveného kovu do formy za účelem získání požadovaného tvaru výrobku. Tento způsob výroby patří k jednomu z nejstarších způsobů zpracování kovů na světě. Počátky se datují až do Biblických dob, přibližně 2500 let BCE. Prvním takto zpracovávaným kovem bylo zlato sloužící jako ozdobné prvky. První zmínky o lití železa pochází z doby okolo 1000 let BCE z Číny a ocel přibližně 500 let př. n. l. z Indie.

Základními prvky procesu lití jsou model, forma, jádro a odlitek. Model slouží jako výchozí předloha pro vytvoření jejího protikusu v podobě formy, do které se odlévá tavenina. Tavenina během fáze tuhnutí dosáhne stavu odlitku s požadovaným konečným tvarem původního modelu. Jádro lze považovat za součást formy, které po odstranění z odlitku vytvoří dutiny. Zjednodušené schéma lití je znázorněno na obrázku 4. [6]



Obrázek 4 Schéma licího procesu [7]

Hliník

Od dob prvních zmínek o metodě lití uběhlo již přes čtyři a půl tisíce let a přesto svou roli začal hrát hliník teprve v roce 1859. Hlavním zdrojem pro výrobu hliníku je ruda uložená v zemské kůře – bauxit (viz Obrázek 5). Nachází se také v jiných minerálech, ale bauxit je ekonomicky nejvýznamnější (ze čtyř až šesti tun lze získat až jednu tunu hliníku). Získává se elektrolýzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech. Celý proces je energeticky náročný, vyžaduje přibližně 20 GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie na jednu tunu hliníku o čistotě 99,9%. [8]

Obrázek 5 Bauxit [9]

Použití hliníku

Postupem času se hliník dostal do všech oblastí průmyslů a provází nás téměř na každém kroku. Jeho rozšíření je až překvapivé vzhledem k tomu, že se komerčně využívá teprve cca. 100 let.

Nejrychleji se rozvíjejícím oborem působení hliníku je dopravní průmysl. Dalšími výraznými oblastmi jsou stavebnický, elektrotechnický, potravinářský a chemický průmysl. V tabulce 1 níže jsou uvedeny poměry spotřeby hliníku v jednotlivých odvětvích z dostupných dat.

Tabulka 1 Poměry spotřeby hliníku

Průmysly	Spotřeba produkce hliníku [%]
Dopravní	59,1
Stavební	18,4
Strojní	10,3
Elektrotechnický	7,2
Potravinářský	4,3
Ostatní	0,7

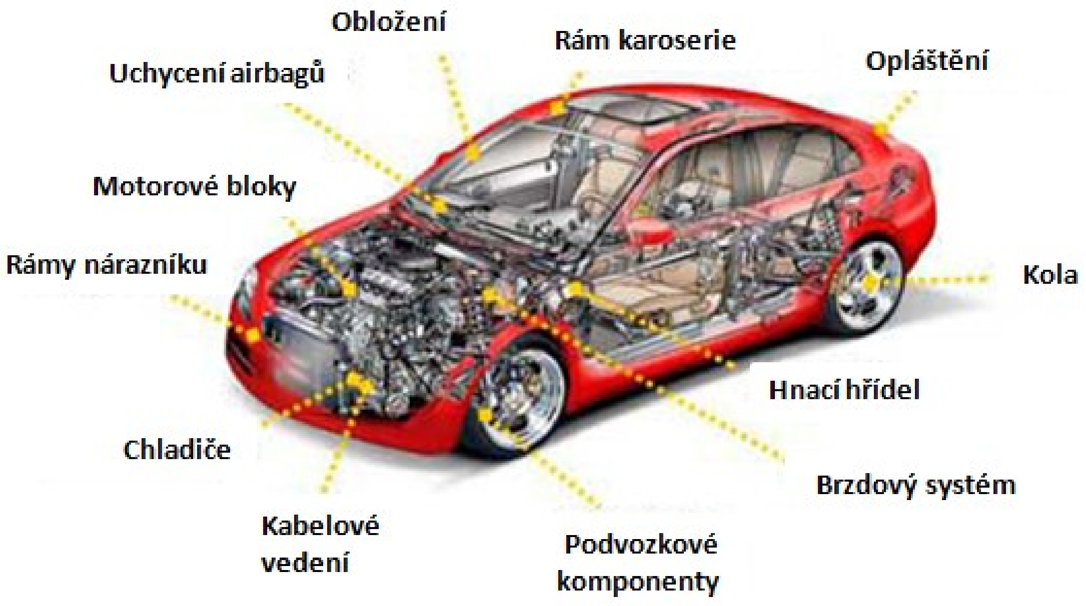
Jak je patrné z tabulky 1, dopravní průmysl vede ve spotřebě s velkým náskokem oproti všem ostatním. Za dopravou jako takovou se skrývá letectví, automobilový průmysl, kolejová a lodní doprava a také kosmonautika. Z dopravy padne nejvíce zdrojů na letecký průmysl, ve kterém hraje hliník klíčovou roli díky nízké hmotnosti a přitom dobrým mechanickým vlastnostem, které odolávají i náročným podmínkám, které musí letadla podstoupit.

V posledních letech se však dostává využití hliníku do popředí také v automobilovém průmyslu. V důsledku neustálého tlaku na snižování emisí bylo nutné automobilový trh přizpůsobit tomuto trendu a nově vyráběné vozidla jsou o poznání lehčí, mimo jiné právě díky aplikaci hliníkových částí. Za posledních 20 let se objem hliníku v konstrukcích automobilů více než zdvojnásobil. Hlavními součástmi jsou:

- motorové komponenty,
- chladiče,
- kola,
- konstrukční prvky karoserie,
- podvozkové komponenty,
- ochranné rámy,
- převodové ústrojí,

Spolu s výhodou nízké hmotnosti s sebou tento materiál přináší i výborné korozivzdorné vlastnosti a s tím související delší životnost dílů a také vynikající schopnosti pohlcování energie během deformací. [8]

Na obrázku 6 níže je vyobrazena dnešní míra využití hliníku v konstrukci automobilu.



Obrázek 6 Využití hliníku v konstrukci automobilu [10]

1.4 Lití hliníku

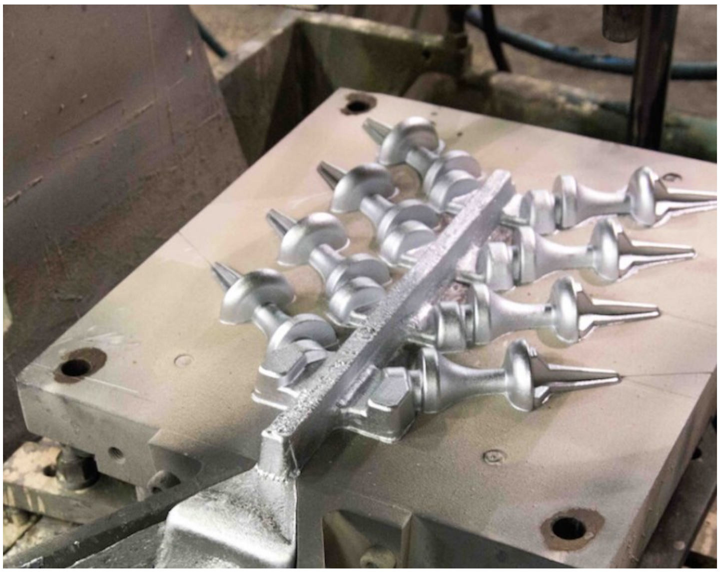
Lití hliníku probíhá za pomoci téměř všech známých slévárenských metod. Výhodou oproti lití slitin železa je vyšší přesnost odlitku s lepší povrchovou kvalitou. Příčinou jsou poměrně nízké tavící teploty, takže během lití nedochází k tak výrazným tepelným dilatacím forem.

Další výhodou jsou příznivé účinky při využití rychlého tuhnutí odlitků. Samotná rychlost tuhnutí prakticky nemá horní hranici a je tedy vhodné i konstrukční řešení, které takové podmínky dovoluje, ideálně tenkostěnné odlitky lité do kovových forem.

Fáze tuhnutí s sebou přináší úskalí v podobě soustředných, nebo rozptýlených staženin. V praxi se tomuto jevu zabraňuje umisťováním nálitků do vhodných pozic, ze kterých je během tuhnutí do odlitku doplňován hliník. [8]

Odlévání do kovových forem

Často využívanou metodou lití hliníku je odlévání do kovových forem. Využívá se především pro menší až střední odlitky v sériové produkci. Uplatnění v maloobjemové, či kusové výrobě se zpravidla nevyplácí kvůli ekonomické náročnosti na pořízení takových forem. Na obrázku 7 je zobrazen příklad jednoduché licí formy.



Obrázek 7 Licí forma [17]

Gravitační lití

Gravitační lití do kovových forem patří k rozšířeným metodám díky své relativní jednoduchosti vzhledem k vysoké produktivitě. Přináší s sebou také řadu výhod. Rychlé ochlazování odlitku a tím tedy i pozitivní vliv na výsledné mechanické a povrchové vlastnosti. Je rovněž možné touto metodou odlévat s výrazně vyšší přesností, což následně znamená menší nároky na mechanické obrábění a v neposlední řadě už z principu kovových forem je jasné, že formy jsou použitelné opakovaně.

Samozřejmě má tato metoda i své specifické požadavky a vlastnosti, kterým je třeba věnovat pozornost. Především je nutná náročnější přípravná část před implementací do výroby. Z důvodu drahé konstrukční i výrobní stránky kovových forem i případných jader se taková výroba vyplácí v případě odlitků litých ve větších sériích.

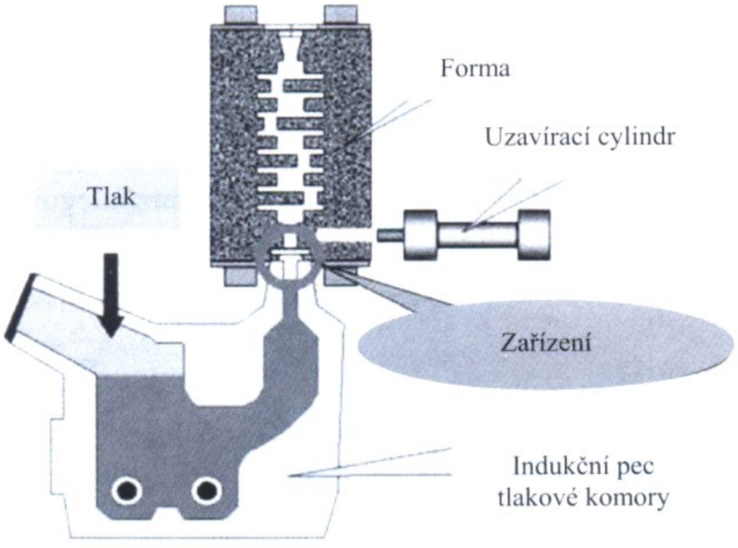
Pokud jde o zařízení, dělí se v dnešní době do dvou okruhů. První možností je jednoduché lití do dělené formy s ruční obsluhou, nebo jde o komplexnější zařízení, které v jedné technologické buňce kombinují dva a více automatizovaných strojů s vlastním pohonem pro manipulaci s formou, zařízení pro údržbu povrhu forem mezi pracovními

cykly a také udržovací pecí, která slouží jako zásobník roztavené slitiny. Příklad technologické buňky s využitím gravitačního lití je na obrázku 8.

Obrázek 8 Gravitační linka

Nízkotlaké lití

Další možností výroby odlitků je lití za pomoci tlaku. Zařízení umožňující tento způsob lití se skládají z několika základních prvků. Nejdůležitější částí je udržovací pec, která na rozdíl od řešení pro gravitační lití musí být hermeticky uzavřena. Skrz horní část udržovací pece vede trubice, která zajišťuje přenos tekutého hliníku z udržovací pece do formy. Samotný přenos taveniny je zprostředkován přetlakem vzduchu působícím na hladinu taveniny v peci. Tavenina je tím pádem pomalu vytlačována trubicí směrem nahoru do formy. Forma jako taková se skládá z pevné a pohyblivé části. Pohyblivá část formy obsahuje tzv. vyražeče, které po ztuhnutí zajistí pozici odlitku v pevné části formy. Princip nízkotlakého lití vysvětluje obrázek 9.



Obrázek 9 Princip nízkotlakého lití [8]

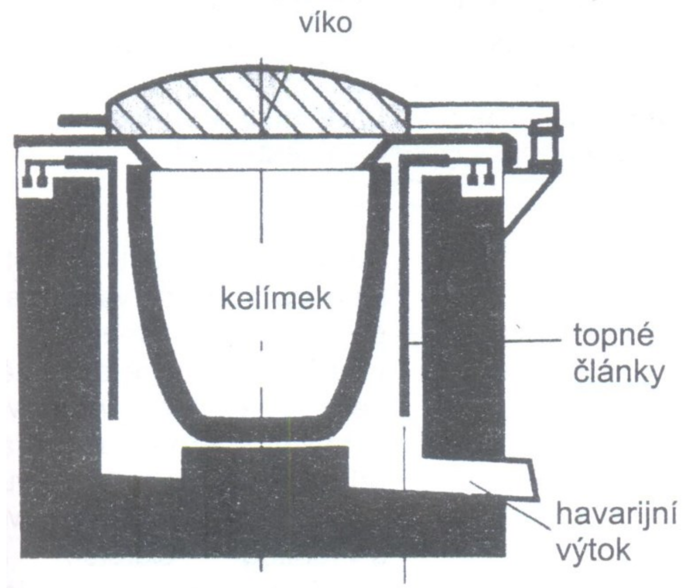
1.5 Příprava taveniny

Ještě před samotným procesem lití je třeba se zaměřit na přípravu taveniny. I tato část procesu je nesmírně důležitá pro pozdější kvalitativní výsledky. Platí jednoduché pravidlo přímé úměry, čím kvalitnější je roztavený kov, tím kvalitnější může být konečný odlitek. Prvním faktorem, který kvalitu ovlivňuje, je chemická čistota kovu (tzn. nejmenší možný obsah vměstků). Tuto čistotu přímo ovlivňují vstupní, neboli vsázkové suroviny, které jsou základem pro tavení. Kvalitu kovu rovněž ovlivňují typy a konstrukce tavících i udržovacích pecí a následující způsoby zpracování taveniny a lití.

Druhy tavících pecí

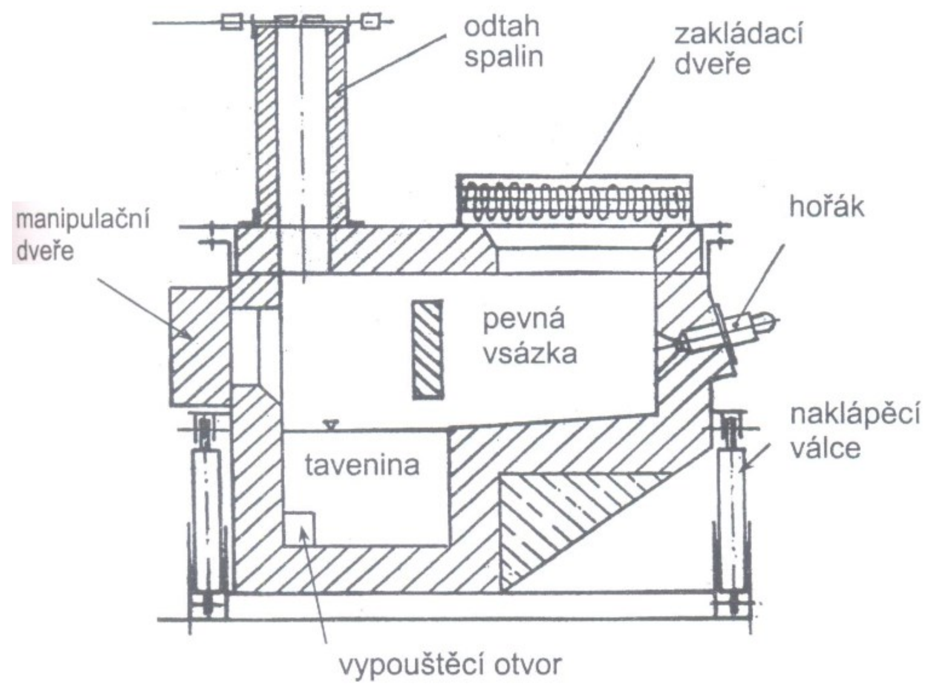
Jak bylo naznačeno v minulém odstavci, základem pro tavení jsou vsázkové suroviny. V praxi se jako vsázka používá čistý hliník dodávaný jako vstupní materiál v podobě tzv. housek a z ekonomických důvodů také vratky z výroby. Tyto materiály jsou vsázeny do tavících pecí, které za působení tepla zprostředkují roztavení vsázky na požadovanou teplotu (zpravidla 650-750 °C).

Kelímkové pece – prvním druhem pece je pec kelímková. Obvykle se používá pro tavení menších množství kovů. Kelímky slouží nejen jako tavící komora ale také jako přepravní jednotka mezi tavící a udržovací pecí. Hlavní výhodou těchto pecí je flexibilita v tavících procesech a druzích slitin. Na obrázku 10 se nachází schematický nákres kelímkové pece.



Obrázek 10 Schéma kelímkové pece [8]

Komorové pece – jsou druhou rozšířenou a ve slévárnách poměrně oblíbenou skupinou tavících pecí. Hlavní předností je rozdělení pece na dvě části. První částí je nístěj, ve které se nachází tavenina a druhou, tavící částí, do které se umisťuje vsázka. Obě části jsou propojeny za účelem odvodu taveniny z tavící části do části nístějové. Výhodou tohoto rozdělení je zamezení přímého kontaktu vsázky a taveniny, který by vedl k nepříznivým vlastnostem taveniny. Na obrázku 11 níže je opět znázorněno schéma pece.

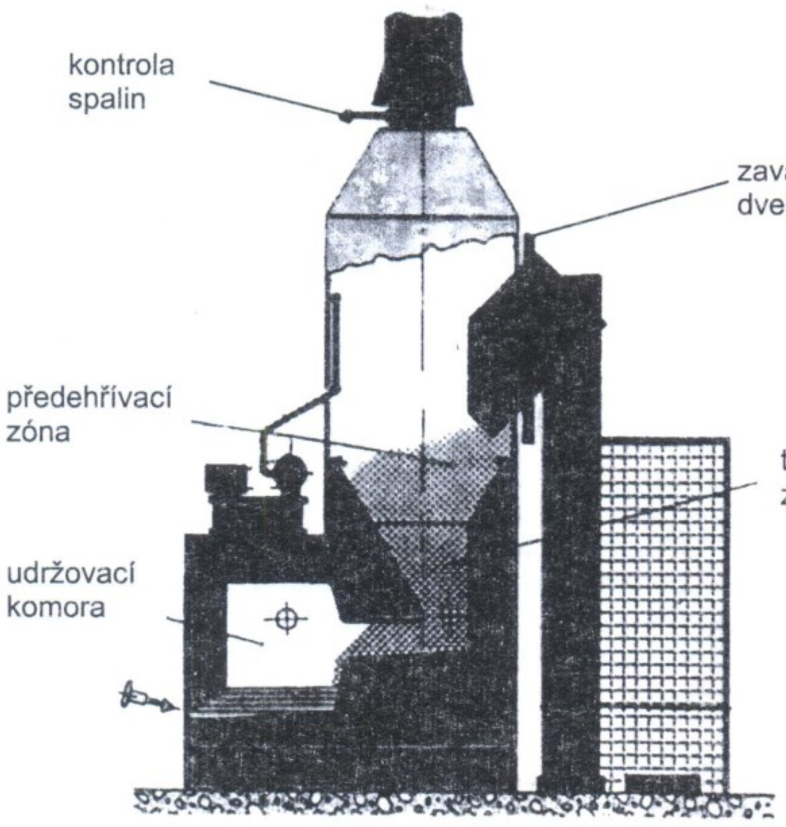


Obrázek 11 Schéma komorové pece [8]

Šachtové pece – posledním zmíněným druhem pece bude šachtová pec. Obdobně jako v případě komorové pece, i u šachtových pecí je vsázka oddělená od taveniny. Vstupní materiály jsou vyvezeny do horní části pece a následně vsazeny do šachtice. Šachtici lze pomyslně rozdělit na horní a spodní část. V horní části dochází k prvotnímu předehřevu materiálu. V části spodní se vsázka natavuje a odtéká v podobě taveniny do udržovací pece. Z té je následně tavenina odebírána naléváním po dávkách obvykle do transportních pánví. Pece jsou vyhřívány plynovými, nebo olejovými hořáky, obvykle bývají u jedné pece použity jeden až dva hořáky v závislosti na velikosti pece. V případě použití dvou hořáků bývají ovládány separátně pro tavící a udržovací část.

Hlavní předností šachtové pece je téměř dokonalé oddělení vsázky od taveniny díky postupnému prohřívání materiálu už v horní části šachtice. V případě, že se ve vsázce vyskytují nějaké zbytky nečistot, nebo vlhkosti, dojde k odpaření ještě před kontaktem

s taveninou. Výsledkem toho je kov s poměrně vysokou čistotou a nízkým stupněm naplynění ihned po tavení (obrázek 12). [8]

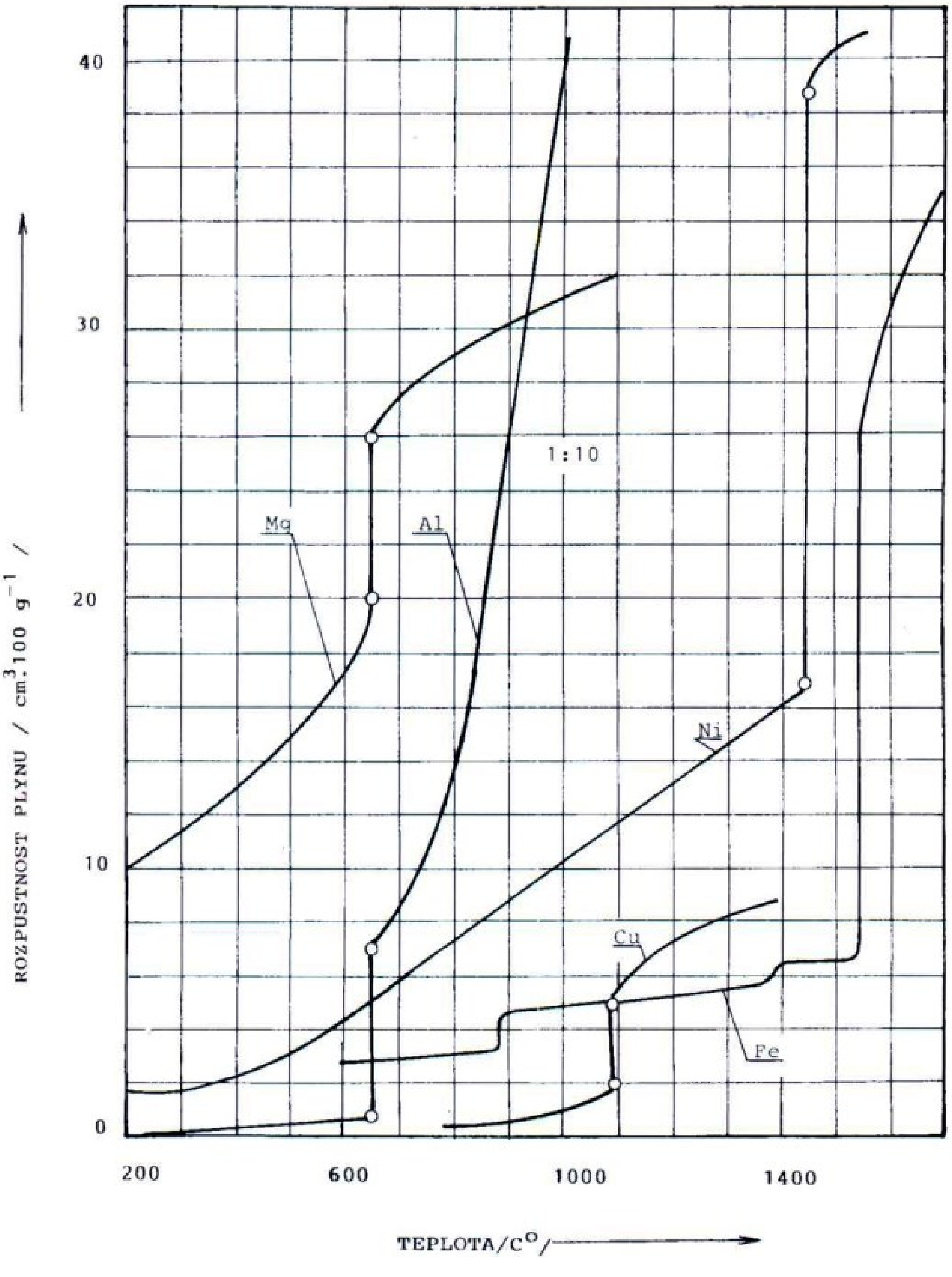


Obrázek 12 Schéma šachtové pece [8]

1.6 Odplynění taveniny

Odplyňování je dalším důležitým krokem po tavení. Cílem této operace je snížit obsah vodíku v tavenině na takovou úroveň, aby nedocházelo k vylučování bublin. Sledovanou veličinou je rozpustnost vodíku, což je nejvyšší množství vodíku rozpustné za rovnovážného stavu. Hlavními zdroji tohoto plynu bývá obecně přítomnost vlhkosti během předchozích operací. Typicky bývá vlhkost v atmosféře uvnitř pece, ve vyzdívkách pece, nedostatečně suchých transportních pánvích, nebo třeba vlivem vlhkých pracovních nástrojů. V neposlední řadě má podstatný vliv také vsázka a to především v podobě vratného materiálu z výroby, která může být zamaštěná, nebo jinak znečištěná.

Rozpustnost vodíku bývá uváděna v jednotkách cm^3 vodíku připadajícího na 100 g kovu. V diagramu na obrázku 13 je zobrazena rozpustnost vodíku v několika průmyslově využívaných kovech včetně hliníku.



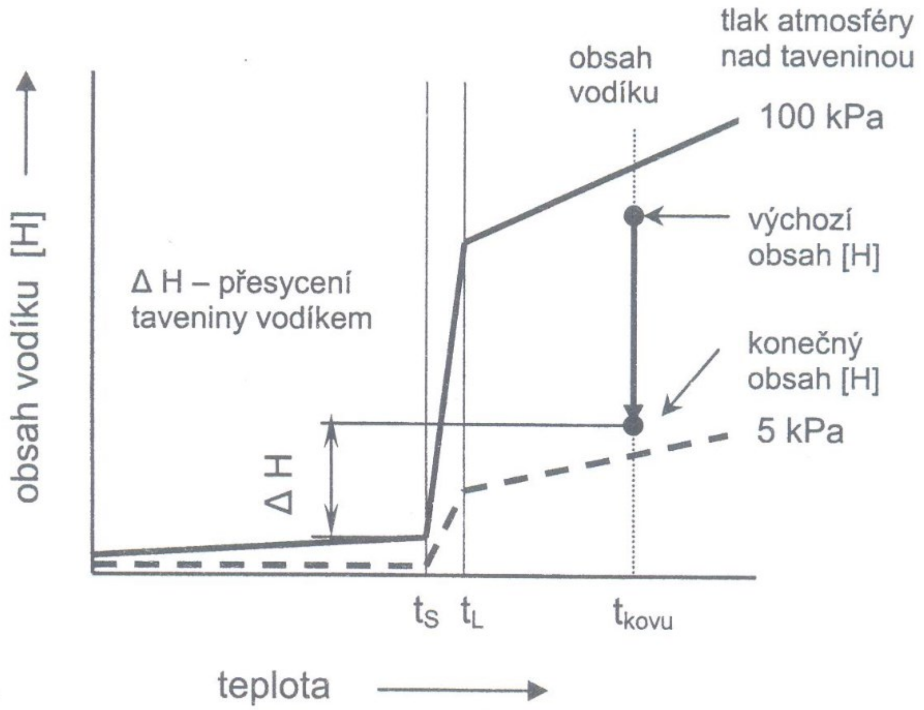
Obrázek 13 Rozpustnost vodíku v kovech [8]

Z diagramu je patrné, že v případě hliníku je značný rozdíl rozpustnosti vodíku v tuhém a v tekutém stavu (viz tvar křivky při teplotě cca 660 °C. Vytvořením vhodných podmínek zmíněných v textu výše (omezení přístupu vlhkosti) lze dosáhnout skutečného množství menšího, než je maximální rozpustnost (tedy pod křivkou). Pokud je naopak skutečné množství vyšší, dochází v tavenině k difuzi, popřípadě k tvorbě nežádoucích bublin. [8]

Pokud bude tavenina silně odplyněná, bude mít ve fázi tuhnutí vyšší sklony ke stažení, což je nutné kompenzovat většími nálitky (viz kapitola 1.8 Lití hliníku). Je tedy z ekonomického hlediska vhodné zvolit kompromis mezi požadovanou výslednou kvalitou a mírou naplynění.

Existují v zásadě dvě možnosti, jak snížit obsah plynů. Jedná se o vakuování taveniny a probublávání taveniny plyny. Z teoretického hlediska by šlo ještě uvažovat o třetí možnosti, tzv. odstátí taveniny, během kterého dojde ke snížení obsahu vodíku difuzí při nižších teplotách blízkých teplotě tavení. Prakticky ale tato metoda nemá zásadní význam kvůli nedokonalosti odplynění a časové náročnosti. [11]

Vakuování taveniny – základním principem odplynění pomoci vakua je snížení tlaku nad hladinou taveniny. Snížením tlaku dojde zároveň k posunu hranice rozpustnosti vodíku, což znamená, že skutečný obsah převyšující tuto hranici ve vakuu bude unikat v podobě bublin. V diagramu na Obrázku14 je zobrazen princip vakuování.



Obrázek 14 Princip vakuování taveniny [8]

Praktické odplynění v průmyslu probíhá umístěním pánve s taveninou do zařízení, které poklopem uzavře pánev a sníží tlak uvnitř atmosféry obvykle na hodnotu přibližně 5 kPa (tedy cca 1/20 atmosférického tlaku). Při tomto tlaku je rozpustnost vodíku asi 4,5 krát menší, než při působení atmosférického tlaku. Odplyňovací cyklus trvá řádově několik minut.

Odplyňování probubláváním plyny – metoda je založena na difuzi vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem, ve kterých je vynášen na hladinu. Pro tyto účely lze užít několik plynů, mohou být inertní, nebo aktivní. V praxi se nejčastěji používají inertní plyny dusík, nebo argon. Principem je vehnat plyn blízko ke dnu tak, aby vytvořil velké množství bublin o malém průměru, do kterých difunduje vodík z taveniny a je v nich následně vynášen na hladinu. Odplynění tímto způsobem trvá tak dlouho, dokud si nejsou rovny parciální tlaky vodíku v tavenině a v bublinách. Účinnost této metody je ovlivněna několika faktory.

- **Velikost bublin** – cílem je vytvořit co největší počet bublin s co nejmenším průměrem z důvodu vytvoření největší možné plochy pro difuzi. Pokud například vytvoří 1 dm^3 bubliny o průměru 10mm, celkový povrch bude roven 6 m^2. V případě, že se povede parametry změnit průměr bublin na 1 mm, bude logicky celkový povrch tvořit 60 m^2. Další výhodou v tomto případě bude nižší rychlost vyplouvání bublin na povrch.
- **Délka dráhy** – dostatečná délka dráhy pro prostup bubliny taveninou vytvoří v kombinaci s nízkou rychlostí dostatečný čas pro difuzi vodíku.
- **Homogenizace** – důležité je rovněž, aby docházelo k důkladnému promíchání taveniny a tím rovnoměrné rozdělení proudů bublin do celého objemu pánve.
- **Čistota plynu** – posledním klíčovým faktorem je vlhkost použitého plynu. Je nutné použití čistého rafinačního plynu (např. dusík o čistotě 99,99%).

Druhou možností je použití aktivních plynů, jako jsou chlor, nebo fluor. Jejich použití je založeno na principu chemické reakce vodíku a plynu. V dnešní době jsou však z důvodu ekologie výrazně omezovány oba plyny a nahrazovány inertními plyny i za cenu nižší účinnosti. [11]

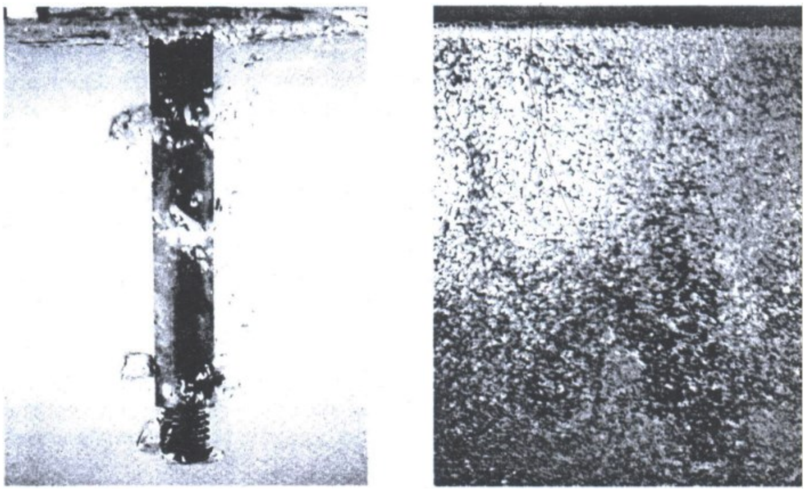
Aplikace metody probublávání plyny – jak bylo zmíněno v předchozích odstavcích, je nutné dodržet klíčové faktory, které ovlivňují kvalitu odplynění. Za účelem probublávání plynů skrze taveninu je možné použít několik způsobů.

- **Odplyňovací trubice** – první možností je trubice s porézní koncovkou. Obvykle jsou použity keramické, nebo grafitové trubice. Porézní koncovka je použita z důvodu minimalizace velikosti bublin. Použití samotné trubice je vhodné spíše pro maloobjemové výroby s menšími kelímky.

- **Porézní vyzdívka** – další možností s podobným výsledkem jako v případě odplyňovací trubice je použití porézních tvárnic do spodní vyzdívky pece. Plyn je tím pádem vháněn z vnější strany.
- **Rotorové zařízení** – v současnosti nejrozšířenější a nejefektivnější způsob odplynění. Principem je vhánění plynu do spodní části pánve skrze rotor, který díky působení odstředivé síly rovnoměrně rozloží nastavené množství bublin do objemu taveniny. Existuje několik konstrukčních řešení, zpravidla se dělí na mobilní a stacionární zařízení. Na obrázku 15 je uvedena mobilní odplyňovací jednotka. [11]

Obrázek 15 Mobilní odplyňovací jednotka [12]

Na obrázku 16 je znázorněno porovnání účinností v tvorbě bublin za použití prosté otevřené trubice (vlevo) a speciální rotační hlavice (vpravo).



Obrázek 16 Porovnání účinnosti otevřené trubice a rotoru [8]

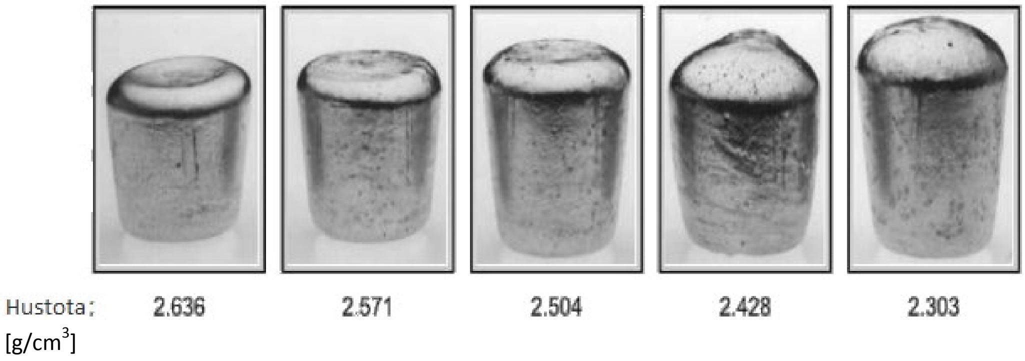
1.7 Měření naplynění taveniny

Metody měření naplynění lze rozdělit na laboratorní a provozní. Pro praktické účely je samozřejmě nutné zvolit vhodnou provozní metodu, která poskytne relevantní informaci o kvalitě odplynění v přijatelném čase.

Laboratorní způsob měření – základním principem je opět odstranění vodíku ze vzorku, který je buď v tuhé fázi (přibližně 50 K pod bodem tuhnutí), nebo ve fázi taveniny. Nevýhodou jsou jednak vysoké náklady na měřící technologie a pak také náročné podmínky pro skladování vzorků (nutno držet při teplotě kapalného dusíku).

Provozní způsoby měření – v rámci výrobních podniků je nutné vzorky vyhodnocovat v co nejkratším čase za účelem uvolnění pánve do výroby. Existuje několik způsobů, které jsou založeny na optickém vyhodnocení vzhledu hladiny ztuhnutého vzorku. Pouhým pohledem je schopen zkušený pracovník odhadnout přípustnost naplynění. Hodnotí se přírůstek na tuhém vzorku. Bubliny vzniklé během fáze tuhnutí způsobí deformaci hladiny vzorku. V případě nízkého stupně naplynění dojde k propadu hladiny, v opačném případě k „nafouknutí“ vzorku.

Lepších výsledků lze dosáhnout stejným postupem s využitím podtlaku, ve kterém se jev úniku vodíku umocní. Pro porovnání je samozřejmě nutné dodržet stejné hodnoty podtlaku, délky působení podtlaku a také přibližně stejný objem zkoušeného vzorku. Na obrázku 17 jsou vzorky s různými hodnotami naplynění po ztuhnutí ve vakuu.



Obrázek 17 Vzorky s různým naplyněním

Metoda dvojího vážení – rozšířeným způsobem pro určení míry naplynění je tzv. metoda dvojího vážení. Jde o porovnání dvou vzorků slitiny. Jeden vzorek je ponechán ke ztuhnutí za působení atmosférického tlaku, zatímco druhý vzorek tuhne ve vakuové komoře.

Postup metody je následující:

1) odběr vzorků taveniny a rozlití do dvou kelímků (zpravidla o objemu 40-80 ml.),
2) vložení jednoho vzorku do vakuové komory (obvykle nastavené na 8 kPa),
3) druhý vzorek je ponechán po stejnou dobu ke ztuhnutí na atmosférickém tlaku,
4) zvážení obou vzorků v prostředí vzduchu,
5) zvážení obou vzorků ponořených ve vodě,
6) z dostupných vážení výpočet hustot obou vzorků,
7) dopočet indexu hustoty

V postupu výše jsou zmíněny výpočty, ke kterým jsou samozřejmě dostupné vzorce. Výpočet objemu vzorku je následující:

$$V_{vz} = \frac{m_{vz_{H2O}}}{\rho_{H2O}} \tag{1}$$

V_{vz} – objem vzorku [m^3]

$m_{vz_{H2O}}$- hmotnost vzorku ve vodě [kg]

ρ_{H2O} - hustota vody [$kg*m^{-3}$]

Pro výpočet hustoty vzorku lze použít vzorec:

$$\rho_{vz} = \frac{m_{vz\,at}}{V_{vz}} = \frac{m_{vz\,at}}{m_{vz_{H2O}}} * \rho_{H2O} \tag{2}$$

$m_{vz\,at}$- hmotnost vzorku ve vzduchu [kg]

ρ_{vz} - hustota vzorku [$kg*m^{-3}$]

Vzorec pro výpočet hustoty výše se aplikuje na vzorek ztuhlý při atmosférickém tlaku i na vzorek ztuhlý ve vakuu. Z těchto dvou hustot se následně vypočte index hustoty (z praxe známý jako Dichte index).

$$DI = \frac{(\rho_{vz\,atm} - \rho_{vz\,vak})}{\rho_{vz\,atm}} * 100 \tag{3}$$

DI - Dichte index [%]

$\rho_{vz\,atm}$- hustota vzorku ve vzduchu [$kg*m^{-3}$]

$\rho_{vz\,vak}$- hustota vzorku ve vakuu [$kg*m^{-3}$]

K výše popsané metodě je tedy třeba mít k dispozici vakuovou komoru, která je schopna vyvinou dostatečný podtlak (obvykle 8 kPa) a přesnou váhu schopnou měřit na jednu setinu vybavenou nádobkou na vodu a závěsným zařízením pro vzorek. V praxi se většinou využívají váhy, které jsou schopny rovnou vypočítat index hustoty. Na obrázku 18 je průmyslová váha uzpůsobená k vážení a výpočtu indexu hustoty. [11]

Obrázek 18 Průmyslová váha [13]

Charakteristika podniku Brembo Czech s.r.o.

Počátky společnosti Brembo S.p.A. sahají na začátek 70. let, kdy Emilio Bombassei, otec dnešního prezidenta skupiny, založil malou mechanickou dílnu v italském městě Bergamo. (obrázek 19).

Obrázek 19 Počátek společnosti Brembo [14]

Díky zkušenostem z oblasti metalurgie a strojírenství se podařilo krátce po založení dosáhnout spolupráce například se společností Alfa Romeo. Už v roce 1964 společnost začala s výrobou brzdových kotoučů.

Dalším důležitým milníkem v historii Bremba byl rok 1972, kdy došlo k rozšíření působnosti také na trh s motocykly, který zajistila spolupráce s Moto Guzzi. V roce 1975 došlo k další klíčové spolupráci, která dostala značku Brembo do závodní série Formule 1, díky které se značka následně rozšířila napříč všemi závodními sériemi. Na obrázku 20 je současné brzdové složení F1.

Obrázek 20 Brzdový systém F1 [15]

V následujících letech začal zájem směřovat především k rozvoji produktů i výrobních procesů. Na trh přišly hliníkové třmeny pro automobilový průmysl, které si velice rychle oblíbila většina hlavních automobilových výrobců, jako jsou Mercedes Benz, BMW, Audi, Porsche, Ferrari a mnoho dalších. Rovněž se povedla expanze do segmentu náhradních dílů pro užitkové vozy.

Od roku 2000 až do současnosti dochází k rozšiřování výrobních podniků napříč celým světem. Dnes se produkty Brembo vyrábí v 15 státech na třech světových kontinentech a prodávají se v 70 zemích. V rámci rozšiřování došlo také ke spojení, nebo odkoupení několika dalších značek působících na automobilovém trhu. Společnost Brembo tedy zahrnuje také Brembo Racing, AP Racing, Marchesini, AP, Sabelt a Breco. Celá skupina zaměstnává přibližně 9000 zaměstnanců a rozrůstá se každým dalším rokem. Kontinuální expanze je hlavním cílem skupiny, díky které se daří zajistit efektivní distribuci výrobků po celém světě. [14]

V roce 2010 se uskutečnila investice do přesunu výrobních kapacit do České Republiky. Zaměřením zdejšího závodu je produkce podvozkových komponentů pro prémiový automobilový trh. Oficiální název společnosti je Brembo Czech s.r.o. (obrázek 21) a zásobuje díly výrobce, jako jsou Land Rover, Audi, Mercedes Benz, BMW, Porsche a řada dalších.

Obrázek 21 Brembo Czech s.r.o (2017) [16]

2 Analýza současného stavu

V rámci ostravské lokace společnosti Brembo se nachází slévárna hliníku, která uvnitř podniku funguje jako interní dodavatel obrobny a montáže. Portfoliem slévárny jsou jak brzdové komponenty v podobě polotřmenů a třmenů, tak rovněž podvozkové komponenty, jako jsou těhlice a ramena. Výroba těchto komponentů obnáší hned na začátku procesu tavení hliníku, jeho odplynění a následné lití. Zadání této práce je navázáno na dílčí proces odplynění taveniny, který zůstává od počátku v roce 2010 bez zásadních změn a očekávaným výsledkem je nové nastavení odplyňovacího procesu za účelem finančních úspor.

Začátkem sledovaného procesu bude proces tavení hliníku. K přípravě taveniny jsou využívány 3 šachtové pece Striko Westofen, které jsou zásobovány materiálem v podobě čistých hliníkových housek a také vratným materiálem, který tvoří odřezky z odlitků, popřípadě zmetkové kusy z následujících operací. Níže na obrázku 22 je zobrazena jedna z tavících pecí.

Obrázek 22 Tavící pec

Samotné tavení hliníku není klíčovým prvkem pro tuto práci. Slouží zde pouze pro ucelený přehled o předchozích a následných procesech, protože pro následující experimenty a vyhodnocení považuji taveninu hliníku za vstupní materiál pro sledovaný proces odplynění.

2.1 Popis odplyňovací jednotky

Odplyňovací jednotka je v podobě stacionárního jednoúčelového zařízení od společnosti HTE, které je trvale na své pozici a je napojeno na centrální rozvod dusíku. Součástí zařízení je výměnný grafitový rotor pro distribuci dusíku do taveniny, termočlánek pro průběžné vyhodnocování teploty taveniny a automatický dávkovač rafinační soli pro snížení ztráty kovového hliníku ve strusce. Na obrázku 23 je zobrazena celá odplyňovací jednotka a na obrázku 24 detail grafitového rotoru (vlevo) a termočlánku (vpravo).

Obrázek 23 Odplyňovací jednotka

Obrázek 24 Grafitový rotor a termočlánek

Z obrázku 24 je rovněž patrné hradidlo sloužící k zamezení turbulenci kovu během odplynění.

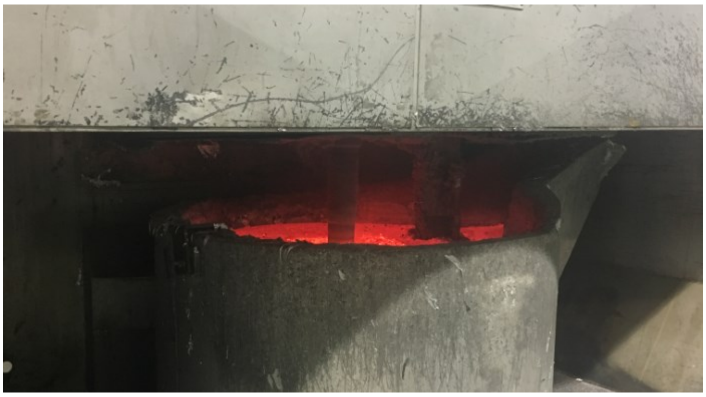
Transport pánve s taveninou

Po naplnění transportní pánve přibližně tunou taveniny z tavící pece je pánev pomoci VZV převezena a umístěna do oplyňovací jednotky (obrázek 25).

Obrázek 25 Umístění pánve do jednotky odplynění

2.2 Odplyňovací cyklus

Ve chvíli, kdy je pánev s taveninou usazena na pracovní pozici, operátor pomoci ovládacího panelu spustí oplyňovací cyklus. Poté se spustí na spodní koncovou pozici ochranný štít, spustí se otáčení rotoru a profuk rotoru, který zamezí ucpání průchozích otvorů pro dusík během prvotního kontaktu s taveninou. Na obrázku 26 je detail stroje během cyklu s ponořeným rotorem, termočidlem i hradidlem v tavenině.



Obrázek 26 Detail stroje během cyklu

Jak bylo zmíněno v teoretické části, hlavními parametry odplyňovacího stroje jsou velikost dusíkových bublin, kterou v tomto případě zajišťuje tvarování grafitové koncovky, délka trasy, která je zde pevně nastavená a díky stejným rozměrům pánví dojde vždy ke shodnému ponoru rotoru do taveniny. Drobné odchylky mohou nastat pouze v případě, že by pánev byla naplněná pouze částečně. K takové situaci však nedochází a drobné odchylky při naplnění pánve jsou zanedbatelné. Dalším parametrem zajištění homogenity správným mícháním taveniny během cyklu. To je zajištěno už samotným principem stroje, který funguje jako rotorové zařízení.

Klíčovými parametry pro tuto práci však budou průtok dusíku grafitovou hřídelí s rotorem a čas pracovního cyklu. Ve výchozí situaci je průtok nastaven na 80 l/min. a pracovní čas na 440 s.

2.3 Měření parametrů taveniny

Již v průběhu odplynění dojde k odběru vzorku za účelem provedení spektrální analýzy kvůli kontroly chemického složení. Tato kvalitativní kontrola je však mimo téma této práce (vlivy ovlivňující chemické složení vstupují před fází odplynění).

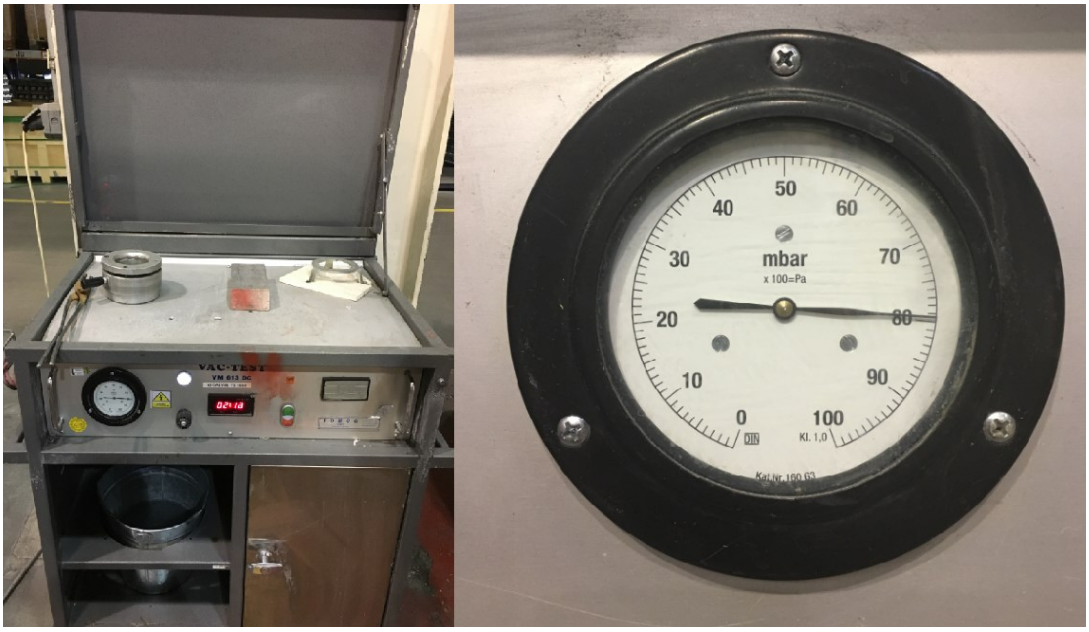
Po ukončení pracovního cyklu odplynění dojde k ručnímu odebrání kontrolního vzorku pro vyhodnocení míry naplynění. Postup znázorňuje obrázek 27 (vlevo nabrání vzorku taveniny do lžíce a vpravo nalití do připraveného vzorkovacího kelímku).

Obrázek 27 Odebrání vzorku pro vyhodnocení naplynění

Vzorkovací kelímek je následně umístěn do vakuové jednotky IDECO VAC TEST pro umocnění efektu úniku vodíku z taveniny (obrázek 28).

Obrázek 28 Umístění vzorku do vakuové jednotky

Po umístění kelímku s taveninou na pozici se vzorek přiklopí krytem, který umožňuje udržení podmínek vakua po spuštění. Hodnota tlaku ve vakuové komoře je 8 kPa a délka pracovního cyklu je 4 minuty, během kterých dochází k postupnému úniku vodíku ze vzorku. Na obrázku 29 níže, je zobrazena celá jednotka vakuové kontroly a detail nastavení tlaku. Rovněž je patrný odpočet ukazující zbývající čas do konce pracovního cyklu.

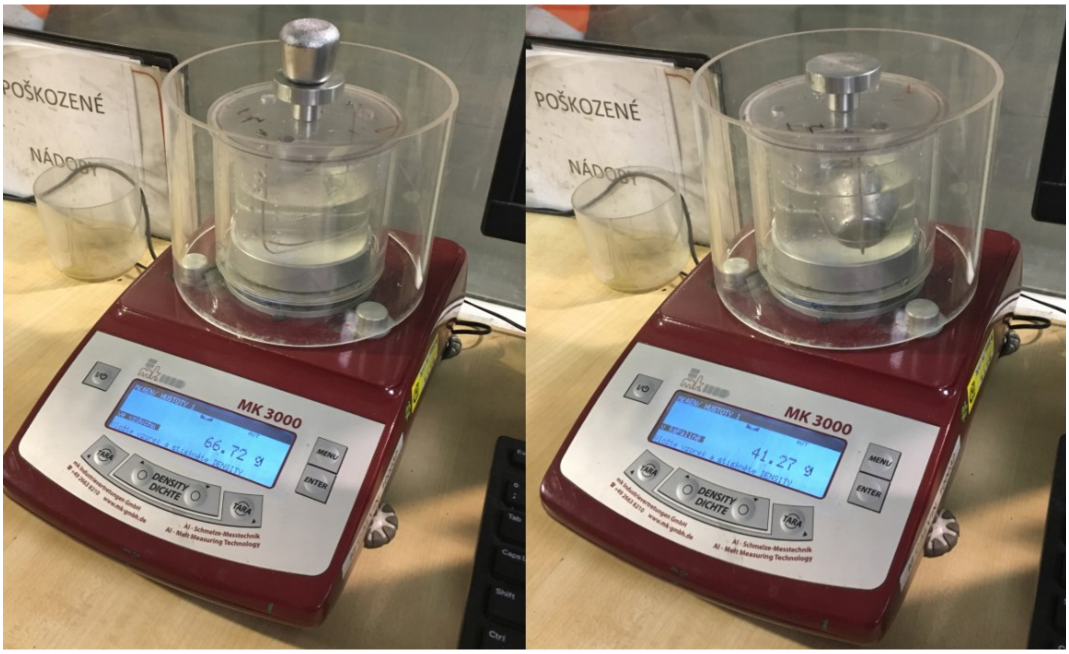


Obrázek 29 Nastavení vakuovací jednotky

Po ukončení pracovního cyklu je vzorek slitiny vyjmut ze vzorkovacího kelímku a ochlazen v připravené nádobě s vodou (obrázek 30).

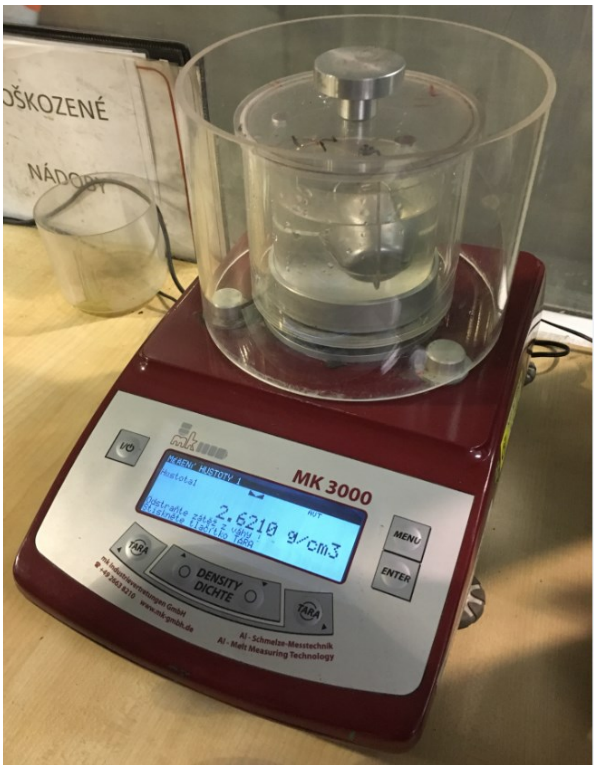
Obrázek 30 Vyjmutí a ochlazení vzorku slitiny

Je zřejmé, že v tuto chvíli už je vzorek v tuhé fázi a je možné jej zvážit pro zjištění naplynění. Vzorek je tedy po ochlazení osušen a umístěn na kontrolní váhu. Je důležité před každým vážením váhu tzv. tárovat, aby byla dodržena přesnost vážení. Vzorek se tedy umístí nejdříve na podložku na vzduchu, kde dojde k prvnímu zvážení, poté se umístí na odkládací přípravek a zváží se váha v kapalině. Oba kroky postupu jsou zobrazeny na obrázku 31.



Obrázek 31 Vážení vzorku na vzduchu a ve vodě

Na displejích váhy je možné v obou případech odečíst váhu vzorků, ze kterých už je možné vypočítat hustotu vzorku. Výhodou však je, že tato průmyslová váha je schopna automaticky tuto hodnotu vypočítávat. Na obrázku 32 je tedy zobrazena výsledná hodnota hustoty vzorku.



Obrázek 32 Výsledná hustota vzorku

V tomto bodě se praxe lehce odklání od teorie. V rámci provozního testování vzorků slitiny se totiž neprovádí celý výpočet DI, ale kontroluje se pouze, zda hodnota hustoty vzorku přesahuje hodnotu 2,6 g/cm3. Jedná se o běžný postup kontroly aplikovaný v řadě sléváren hliníku.

Tímto tedy končí kontrola jedné transportní pánve, která dle pozitivního výsledku může být uvolněna do výroby a převezena k licímu stroji, kde je přelita do udržovací pece licího stroje. Ve slévárně se nachází licí stroje s technologií gravitačního a nízkotlakého lití.

Klíčové parametry z příkladu měření jsou shrnuty v následující tabulce 2.

Tabulka 2 Číselné údaje z analýzy výchozího stavu

Veličina	Hodnota	Jednotka
Průtok dusíku	80	l/min
Čas odplynění	440	s
Tlak ve vakuové komoře	8	kPa
Čas procesu vakua	240	s
Hustota vzorku	2,621	g/cm^3
Závěr měření	OK	-

2.4 Shrnutí současného stavu

Závěrem analýzy současného stavu je vhodné vztáhnout získaná data k objemu produkce. Během každé výrobní směny dojde k odplynění přibližně 30 pánví taveniny. Vzhledem k nepřetržitému provozu tří směn (během víkendu dvou dvanáctihodinových) to znamená, že ročně dojde k odplynění téměř 33 tisíc pánví, které zaberou kolem 4 tisíc hodin strojového času a spotřebují přes 19 milionů litrů dusíku v plynném skupenství.

2.5 Stanovení cílů diplomové práce

Hlavním cílem této práce je návrh experimentů na základě informací zjištěných z analýzy současného stavu, provedení definovaných experimentálních měření, jejich vyhodnocení a následná aplikace optimálního nastavení s konečným zhodnocením přínosů pro podnik.

3 Experimenty a vyhodnocení získaných poznatků

V rámci trvalého zlepšování a optimalizace byl vybrán proces odplynění taveniny jako oblast s možným prostorem pro nalezení finančních úspor. Vzhledem k výše vysvětlené povaze procesu je vhodné se vydat experimentální cestou a i přes to, že v tomto případě nebude plně využitý celý potenciál pokročilých metod DOE, hodí se využít při tom základní princip DOE za účelem zachování jednotné logiky a jasné struktury experimentální části.

3.1 Plánování experimentů

Na začátku je nutné si vymezit vstupní podmínky, ovlivňující faktory, počty úrovní a jejich nastavení. Prvním vymezující podmínkou je předpoklad přibližně stejného vstupního materiálu, kterým je tavenina z tavící pece. To je zajištěno stále stejnou velikostí transportní pánve, tedy přibližně jedna tuna taveniny. Regulovatelné ovlivňující faktory, se kterými lze operovat, a mohou generovat vyčíslitelnou úsporu, jsou pak dva. Prvním je průtok dusíku, který je možné regulovat a druhým je pracovní čas cyklu, který je také možné nastavovat. Pro v praxi proveditelný experiment byly zvoleny 3 úrovně pro každý faktor.

Navržení experimentů

Jak už bylo řečeno v minulém odstavci, budou provedeny plné experimenty pro 2 faktory o třech úrovních, což z kombinatoriky vychází na celkem 9 experimentálních nastavení a měření. Už ze zadání je jasné, že jsou v této oblasti očekávané úspory, ale není předem známé, jak moc nastavení času a průtoku ovlivní výslednou hustotu. Proto bylo v rámci experimentu rozhodnuto o provedení výchozího měření pěti vzorků z pěti pánví na 50% nastavení obou veličin. Na základě těchto prvotních měření bude rozhodnuto, zda se bude nastavení parametrů zvyšovat, nebo snižovat. Níže v tabulce 3 je znázorněna výchozí logika experimentu.

Tabulka 3 Výchozí logika experimentů

Číslo měření	Nastavení čas/průtok [%]	Průtok [l/min]	Čas [s]
9	80/80	64	352
8	70/80	56	352
7	60/80	48	352
6	80/70	64	308
5	70/70	56	308
4	60/70	48	308
3	80/60	64	264
2	70/60	56	264
1	60/60	48	264
0	50/50	40	220
1	40/40	32	176
2	30/40	24	176
3	20/40	16	176
4	40/30	32	132
5	30/30	24	132
6	20/30	16	132
7	40/20	32	88
8	30/20	24	88
9	20/20	16	88

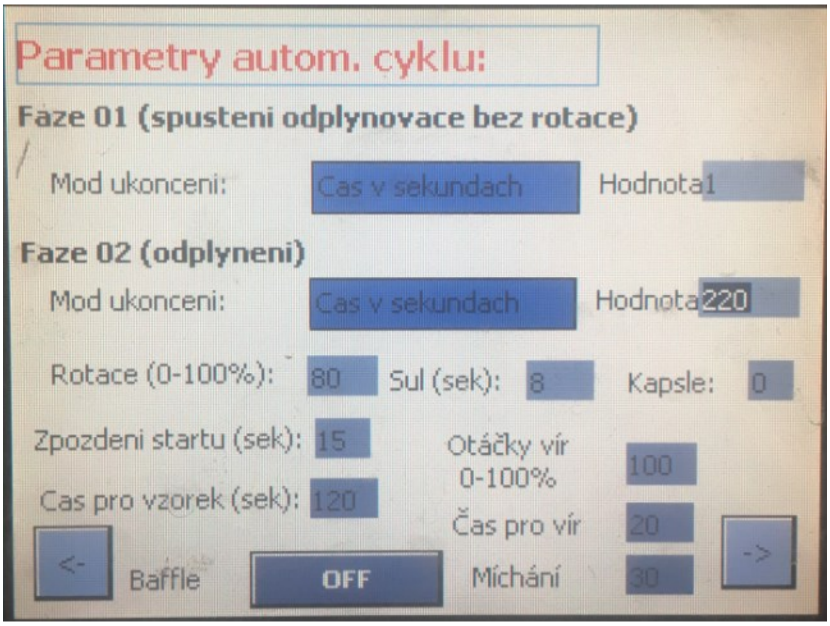
Z tabulky je zřejmých již zmíněných 9 měření, které vychází ze vzájemných kombinací 3 úrovní obou faktorů. Pro dostatečné pokrytí celého spektra rozsahu bylo zvoleno krokování po deseti procentních přídavcích, nebo úbytcích. Rozsah testů tedy pokrývá nastavení 20 – 80%.

3.2 Provedení experimentů

Principielní postup pro získávání dat zůstane shodný dle kapitoly 3 (Analýza současného stavu). Měnit se bude pouze nastavení parametrů odplyňovacího zařízení dle Tabulky 3 a manipulace s experimentální taveninou. Změna parametrů probíhá následovně:

Změna nastavení času pracovního cyklu

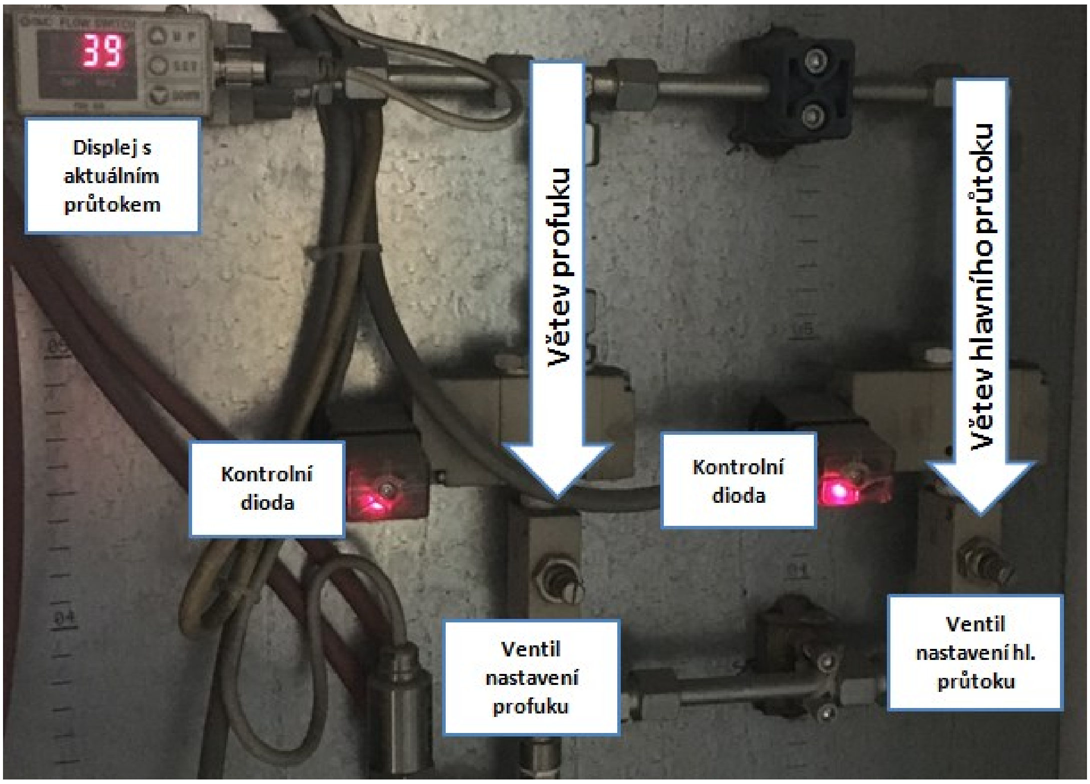
Pro změnu je nutné zadat přístupové heslo do PLC panelu stroje a následně na obrazovce parametrů automatického cyklu přepsat hodnotu u Fáze 02 (odplyneni) na příslušnou hodnotu dle tabulky (viz obrázek 33).



Obrázek 33 Změna nastavení programu v PLC

Změna nastavení průtoku dusíku

Tento parametr nelze nastavit v řídícím programu PLC jednotky. Pro změnu je nutné ruční nastavení na ventilech v rozvodné skříni plynů stroje. Rozvody plynu jsou vybaveny digitálními displeji se zobrazením aktuálního průtoku, není tedy nastavení žádnou komplikací v experimentu. Celkový průtok během pracovního cyklu se skládá ze dvou separátních průtoků. První část průtoku tvoří nižší hodnota, která se používá jako tzv. profuk za účelem zabránění ucpání rotoru při kontaktu s taveninou. Druhá část je dopočet do požadované hodnoty průtoku. Hodnotu profuku je nutné stihnout nastavit ve chvíli, kdy je spuštěn pracovní cyklus, ale rotor je stále nad úrovní taveniny v pánvi (15 s.). Ve chvíli, kdy se rotor ponoří do taveniny, stroj připojuje i druhou větev rozvodu a displej v tu chvíli ukazuje pouze celkový průtok přes obě větve a v tu chvíli je tedy možné druhým ventilem nastavit celkový požadovaný průtok. Bude-li tedy například v rámci experimentu požadováno nastavit celkový průtok na 45 l/min., v prvních 15 s. pod sepnutí stroje bude na ventilu profuku nastavena hodnota 20 l/min. a po připojení druhé větvě (připojení je patrné z rozsvícení kontrolních diod průtokoměrů) bude pomoci nastavení druhého ventilu přizpůsoben průtok tak, aby displej ukazoval 45 l/min. Vzhledem k nastavení průtoku během cyklu bude vždy první pánev vrácena bez vyhodnocení do tavící pece a vzorek bude odebrán až z druhé pánve, která bude mít požadované nastavení již od začátku oplyňovacího cyklu. Na obrázku 33 jsou znázorněny a popsány obě průtokové větve.



Obrázek 34 Detail nastavení průtoku

Manipulace s taveninou – veškeré pánve s taveninou odplyněnou na experimentální nastavení budou v rámci zachování kvalitativního hlediska nality zpět do tavící pece, aby nedošlo k ohrožení zákazníků případnou nekvalitní taveninou.

Výchozí měření – po nastavení požadovaných 50 % hodnot na času pracovního cyklu i průtoku dusíku proběhlo odplynění pěti transportních pánví s výsledky zobrazenými v tabulce 4.

Tabulka 4 Výsledky výchozího "nultého" měření

Číslo měření	Nastavení čas/průtok [%]	Čas [s]	Průtok [l/min]	Hustota vzorku 1. pánve [g/cm3]	Hustota vzorku 2. pánve [g/cm3]	Hustota vzorku 3. pánve [g/cm3]	Hustota vzorku 4. pánve [g/cm3]	Hustota vzorku 5. pánve [g/cm3]
0	50/50	220	40	**2,590**	2,603	**2,592**	2,611	**2,589**

Z tabulky je patrné, že tři z pěti testovaných pánví nevyhovují internímu požadavku a jsou pod hranicí 2,6 g/cm^3.

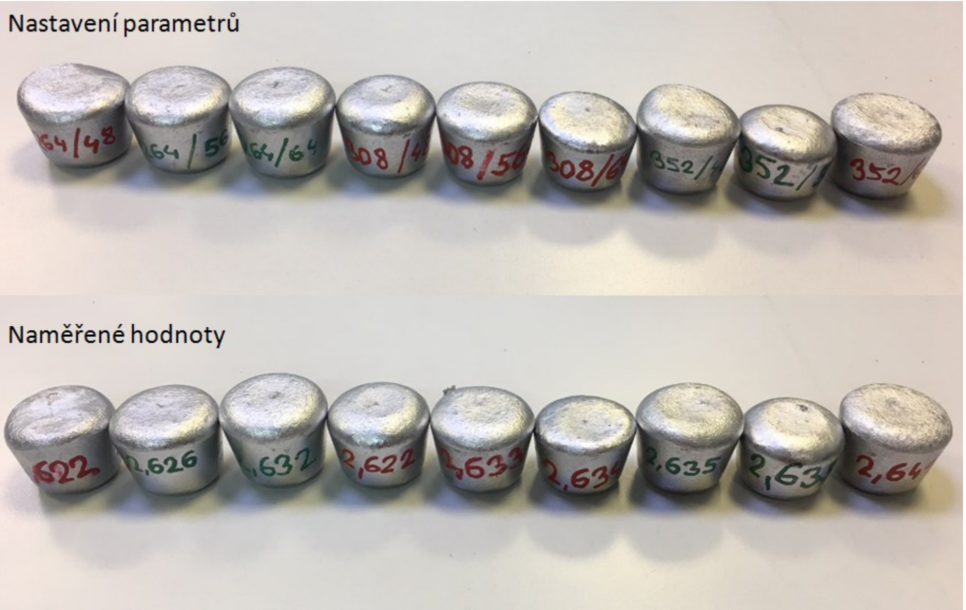
Z tohoto výsledku je zřejmé, že na poloviční nastavení není proces dostatečně stabilní a pro plný rozsah experimentu bude tedy zvolen směr nahoru (postupné 10% přídavky).

Výsledná tabulka 5 zobrazuje konečnou podobu logiky nastavení plného experimentu.

Tabulka 5 Konečná logika posloupnosti experimentů

Číslo měření	Nastavení čas/průtok [%]	Průtok [l/min]	Čas [s]
9	80/80	64	352
8	70/80	56	352
7	60/80	48	352
6	80/70	64	308
5	70/70	56	308
4	60/70	48	308
3	80/60	64	264
2	70/60	56	264
1	60/60	48	264
0	50/50	40	220

Dle výše zmíněného postupu provedení experimentů proběhlo odebrání vzorků z devíti testovacích pánví, které byly odplyněny s procesními parametry dle tabulky 5. Na následujícím obrázku 35 jsou vyfoceny vzorky včetně poznačených nastavení a výsledných hodnot hustoty.



Obrázek 35 Experimentální vzorky

3.3 Vyhodnocení experimentů

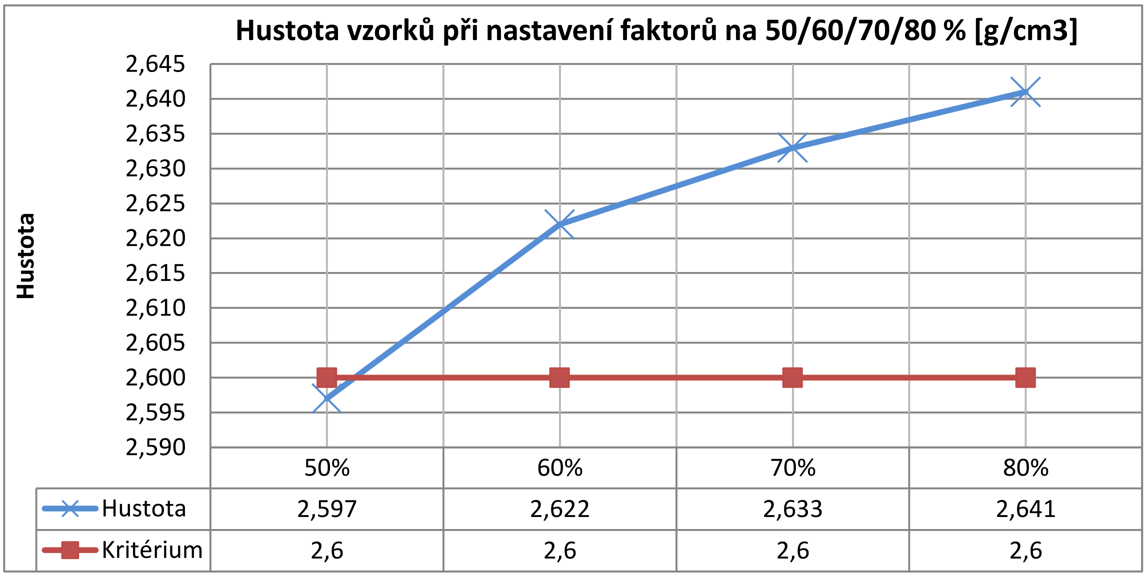
Všechny naměřené výsledky a přehled nastavení úrovní jsou pro přehlednost zobrazeny v tabulce 6 níže.

Tabulka 6 Vyhodnocení experimentů

Číslo měření	Nastavení čas/průtok [%]	Průtok [l/min]	Čas [s]	Hustota vzorku [g/cm3]	Hodnocení vzorku
9	80/80	64	352	2,641	OK
8	70/80	56	352	2,635	OK
7	60/80	48	352	2,635	OK
6	80/70	64	308	2,606	OK
5	70/70	56	308	2,633	OK
4	60/70	48	308	2,622	OK
3	80/60	64	264	2,632	OK
2	70/60	56	264	2,626	OK
1	60/60	48	264	2,622	OK

Všechny testovací vzorky s nastavením úrovní u obou faktorů v rozsahu 60-80% splnily interní kvalitativní kritérium hustoty větší, než 2,6 g/cm^3 a teoreticky by tedy mohly být uvolněny a použity pro výrobu.

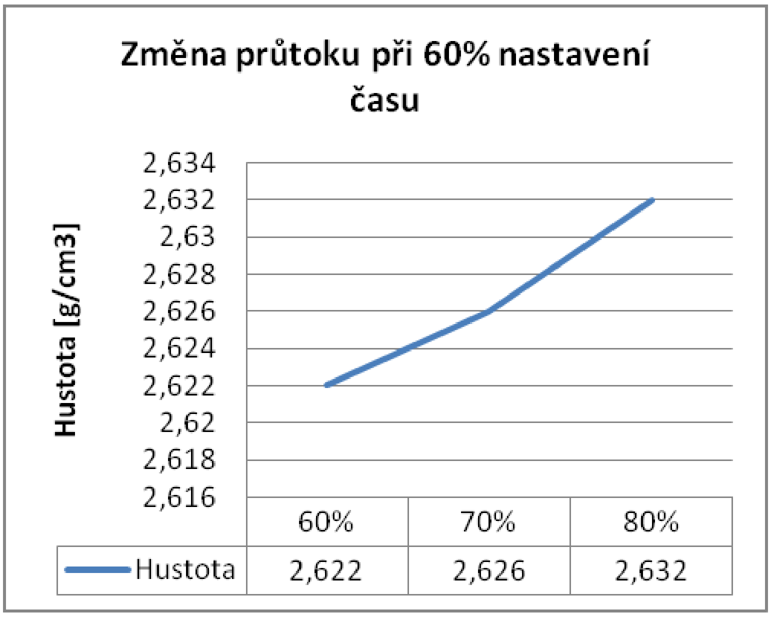
V Grafu 1 je znázorněna změna hustoty vzorku při postupném nastavení úrovní obou faktorů 50 % až 80%.



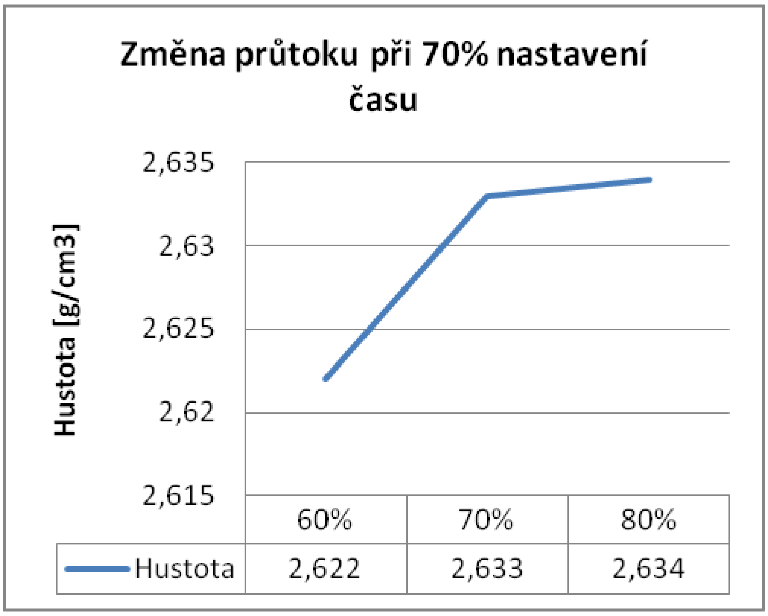
Obrázek 36 Hustota vzorků při nastavení faktorů na 50/60/70/80 %

Z grafu na obrázku 36 je patrné, že při nastavení úrovní obou faktorů na hodnoty 60 – 80% je změna prakticky lineární na rozdíl od 50% nastavení, u kterého je zřejmý strmější pokles až pod přípustnou hodnotu hustoty. Dalšími experimenty s menším procentuálním krokováním by pravděpodobně bylo možné najít ještě další bezpečná nastavení mezi padesáti a šedesáti procenty.

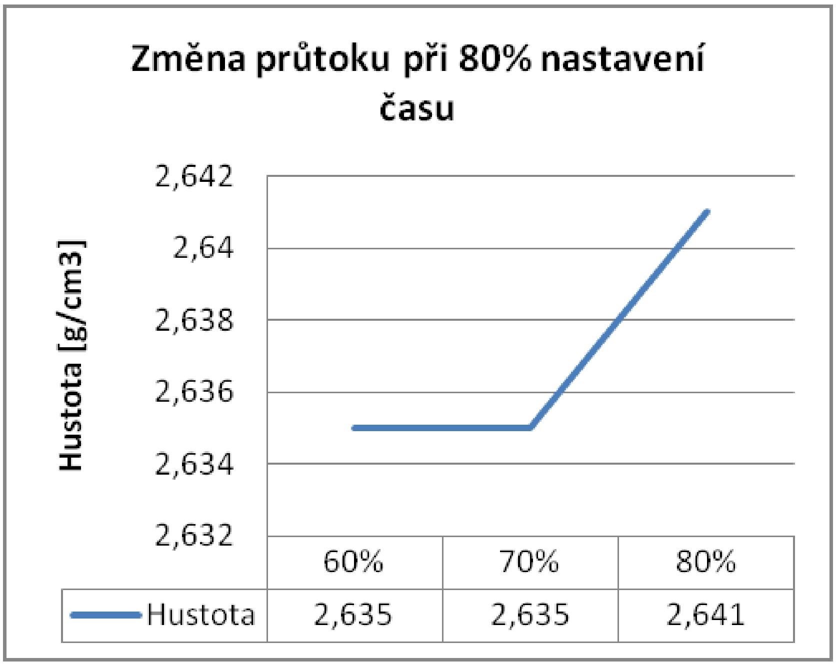
Jako další část vyhodnocení je níže postupně přiloženo šest obrázů s grafy, které vyjadřují závislosti změny úrovní jednoho faktoru při zachování úrovně faktoru druhého.



Obrázek 37 Změna průtoku při 60% nastavení času

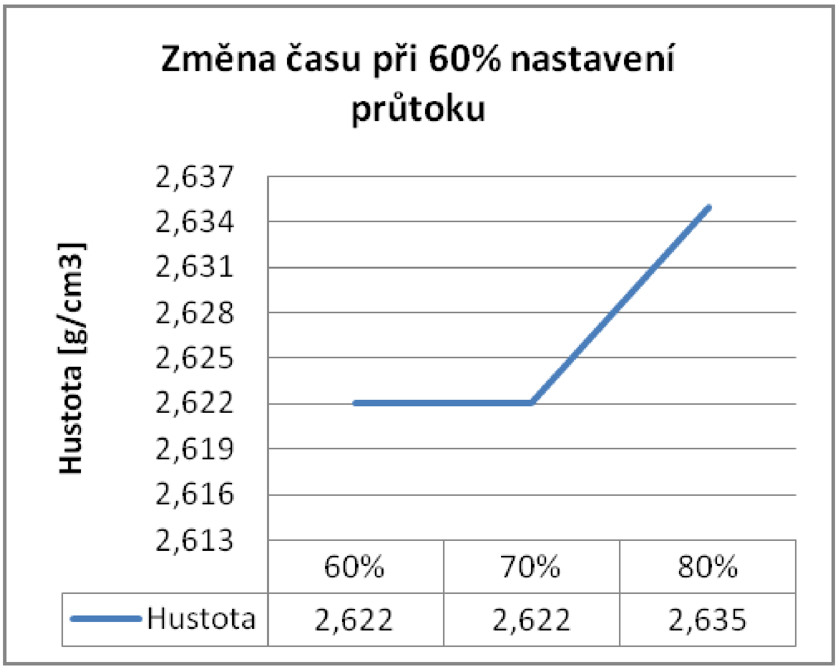


Obrázek 38 Změna průtoku při 70% nastavení času

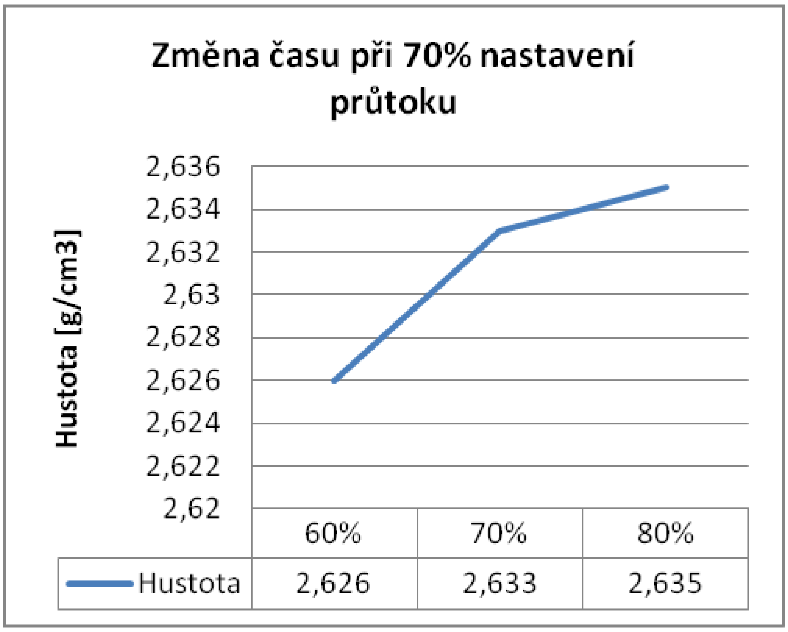


Obrázek 39 Změna průtoku při 80% nastavení času

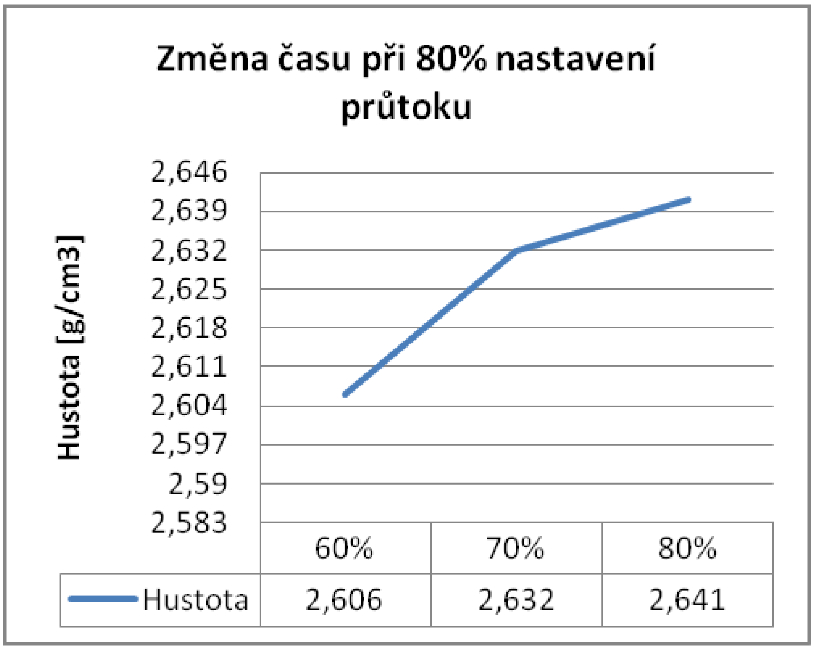
Výše zobrazené grafy na obrázcích 37, 38 a 39 znázorňují trendy, které vykazovaly náměry hustoty vzorků během postupné změny nastavení průtoku při konstatních nastaveních času odplynění (264, 308 a 352s.).



Obrázek 40 Změna času při 60% nastavení průtoku



Obrázek 41 Změna času při 60% nastavení průtoku



Obrázek 42 Změna času při 80% nastavení průtoku

Obrázky 40, 41, a 42 zobrazují změny v naměřených hustotách vzorků během postupné změny nastavení času odplynění při zachování konstantního průtoku (48, 56 a 68 l/min).

Z grafů je patrné, že existují závislosti změny hustoty vzorků jak na změně času, tak na změně průtoku. Všechny grafy znázorňují shodný rostoucí trend. Má tedy během optimalizace smysl operovat s oběma faktory.

4 Přínosy pro podnik a implementace

Na základě provedených experimentů lze říci, že bezpečná hranice pro nastavení odplyňovacího procesu je 60% nastavení průtoku i času, což znamená možnou úsporu až 40% u obou faktorů. Snížení každého z faktorů s sebou přináší několik úspor.

První vyčíslitelná úspora je na samotném dusíku. Jak bylo v textu zmíněno, v podniku je centrální rozvod dusíku, který odebírá dusík z kryogenní nádrže, do které se dusík přečerpává z cisteren. Nelze bohužel použít oficiální nákupní cenu dusíku, proto je výpočet úspory vztažen k veřejně dostupné ceně dusíku, což je 18 Kč/litr v kapalném skupenství. Z jednoho litru kapalného dusíku se odpaří přibližně 646 l dusíku v plynném skupenství, což znamená, že na odplynění jedné pánve připadá spotřeba 0,9 l dusíku – tedy přibližně 16 Kč. Dle kapitoly 3.5 (Shrnutí současného stavu) je roční objem produkce odplynění téměř 33 tisíc pánví, v nákledech kolem 537 000 Kč. Pokud bude dosaženo 40% úspory na průtoku dusíku a 40% na délce cyklu, lze ročně na tomto médiu ušetřit přibližně 340 000 Kč ročně.

Další vyčíslitelnou úsporou je prodloužení životnosti grafitových rotorů v závislosti na délce cyklu. V současném stavu se grafitový rotor mění 2x týdně. Při započítání 2 oplyňovacích jednotek a 52 týdnů v roce vychází roční spotřeba na 104 ks rotorů. Jeden grafitový rotor stojí přibližně 9 000 Kč, což představuje roční náklady cca 936 000 Kč. Za předpokladu, že by se při 40% snížení času pracovního cyklu snížilo také opotřebení rotorů o 40%, znamenalo by to úsporu 384 000 Kč.

Vedle vyčíslitelných úspor s sebou řešení přináší také další, bohužel v tuto chvíli nevyčíslitelné výhody. V případě omezení délky pracovního cyklu odplyňovací stanice by bylo možné snížit výhřev udržovacích komor na tavících pecích díky tomu, že by se tavenina dostala dříve k udržovacím pecím u licích strojů. Vzhledem k energetické náročnosti se jedná o významnou úsporu, nicméně výši této úspory lze vyčíslit až porovnáním současné a případně budoucí spotřeby plynu u udržovacích komor tavících pecí. Dalším potencionálním přínosem zkrácení času odplyňovacích cyklů je možnost navýšení celkové kapacity slévárny bez nutnosti investice do nového odplyňovacího zařízení.

V tabulce 7 je přehledný výpočet teoretických ročních úspor, které s sebou optimalizace přináší.

Tabulka 7 Přehled vyčíslitelných úspor

	Současný stav	Jednotky	Optimalizovaný stav	Jednotky	Úspory	Jednotky
Délka pracovního cyklu	440	s	264	s		
Průtok dusíku	80	l/min	48	l/min		
Spotřeba dusíku na pánev	587	l	211,2	l		
Počet pánví za směnu	30	ks	30	ks		
Počet pánví za rok	32850	ks	32850	ks		
Roční náklady za dusík	536991	Kč	193317	Kč	343674	Kč
Spotřeba rotorů za rok	104	ks	62	ks		
Cena rotoru	9000	Kč	9000	Kč		
Roční náklady na rotory	936000	Kč	561600	Kč	374400	Kč
			Úspory celkem	**718 074 Kč**		

5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byl návrh a provedení experimentálních měření odplynění taveniny hliníku se zjištěním optimálního nastavení splňující interní kvalitativní kritéria a zároveň přinášející zefektivnění celého odplyňovacího procesu, konkrétně tedy úspory na spotřebovaném odplyňovacím médiu a čase odplynění.

Po prvotní analýze současného stavu procesu byly definovány kroky experimentu a očekávané výsledky. Výchozí měření s 50% nastavením obou regulovatelných faktorů (průtoku dusíku a času cyklu) přineslo nestabilní výsledky, na základě kterých byl vymezen další postup experimentu v podobě postupného 10% přírůstku na každém z faktorů a průběžné měření hodnoty naplynění na každém z testovacích vzorků. Po naměření výsledků v celém rozsahu plánovaných nastavení se ukázaly jako stabilní a bezpečné všechny hodnoty s 60% a vyšším nastavením na obou faktorech. Z tohoto závěru je patrné, že lze dosáhnout 40% úspořy jak na spotřebě odplyňovacího média, kterým je dusík, tak na strojovém čase. Kromě přímé 40% úspory s sebou optimalizované nastavení přináší také výhody v podobě znatelně nižšího opotřebení a spotřeby funkčních komponentů odplyňovacího zařízení, úsporu na spotřebě plynu pro vytápění udržovacích pecí díky zkrácení manipulační doby mezi tavící pecí a licím strojem, nebo případnou rezervu v případě navýšení výrobních kapacit.

Veškeré údaje z této práce budou ve společnosti Brembo Czech s.r.o. využity jako podklady k otevření diskuze o trvalé implementaci, které však musí předcházet rozsáhlejší kvalitativní testy, následné schválení mateřským závodem Brembo S.p.A a také schválení ze strany zákazníků.

Seznam použité literatury

1. Botek M.: *Sbírka příkladů z inženýrské ekonomiky a managementu*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2004. Str. 4. ISBN 80-7080-544-7
2. NOVÁK, J a ŠLAMPOVÁ, P. *Racionalizace výroby*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2007. 75 s. CZ.04.1.03/3.2.15.3/0414
3. A QUICK HISTORY OF THE DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z <https://newonlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/6/>
4. P.Q.M.: DOE (DESIGN OF EXPERIMENTS) [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < http://www.pqm.cz/nvcss/met_PDF/DOE_webcss.pdf>
5. MONTGOMERY, D.C. *Design and analysis of experiments (8th Edition).* John Wiley & Sons. 2012. ISBN 978-1-118-14692-7
6. KAUFMAN, J. G. *Aluminum alloy castings properties, processes and applications*. nakladatelství ASM International®, 2004. ISBN 0-87170-803-5
7. Sand casting [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>
8. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
9. Bauxit[online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < https://cs.wikipedia.org/wiki/Bauxit>
10. Resistance welding of aluminium and aluminium alloys (group 16) [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < https://www.slideshare.net/EmadMayor/resistance-welding-of-aluminium-and-aluminium-alloys-group-16>
11. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
12. Rotary degassing machina for motlet aluminium [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z <http://www.energysystech.com/Rotary_Degassing_Unit.html>
13. Elektronische Dichte-Index Waage MK 3000 [online]. [cit. 17.05.2018]. Dostupné z < http://www.mk-gmbh.de/produkte/sind-sie-zufrieden-mit-ihrer-al-schmelze-reinheit/stationaere-messstation-basic/archimedisches-prinzip-automatische-ermittlung-des-dichte-index.html>

14. History | Brembo [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < http://www.brembo.com/en/company/about/history>

15. Bigger brakes for 2017 F1 Brembo brakes [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z < http://www.brembo.com/en/company/news/bigger-brakes-for-2017-f1-brembo-brakes>

16. Brembo expanduje v CTParku Ostrava [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z <http://www.automakers.cz/brembo-expanduje-v-ctparku-ostrava/>

17. Pernament Mold Casting Process [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z <http://batesvilleproducts.com/process.html>

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 Výrobní proces [2] ... 9
Obrázek 2 Princip racionalizace [2] ... 11
Obrázek 3 Schéma DOE [3] ... 13
Obrázek 4 Schéma licího procesu [7] ... 15
Obrázek 5 Bauxit [9] ... 15
Obrázek 6 Využití hliníku v konstrukci automobilu [10] ... 17
Obrázek 7 Licí forma ... 18
Obrázek 8 Gravitační linka ... 19
Obrázek 9 Princip nízkotlakého lití [8] ... 19
Obrázek 10 Schéma kelímkové pece [8] ... 20
Obrázek 11 Schéma komorové pece [8] ... 21
Obrázek 12 Schéma šachtové pece [8] ... 22
Obrázek 13 Rozpustnost vodíku v kovech [8] ... 23
Obrázek 14 Princip vakuování taveniny [8] ... 24
Obrázek 15 Mobilní odplyňovací jednotka [12] ... 26
Obrázek 16 Porovnání účinnosti otevřené trubice a rotoru [8] ... 26
Obrázek 17 Vzorky s různým naplyněním ... 27
Obrázek 18 Průmyslová váha [13] ... 29
Obrázek 20 Brzdový systém F1 [15] ... 30
Obrázek 19 Počátek společnosti Brembo [14] ... 30
Obrázek 21 Brembo Czech s.r.o (2017) [16] ... 31
Obrázek 22 Tavící pec ... 32
Obrázek 23 Odplyňovací jednotka ... 33
Obrázek 24 Grafitový rotor a termočlánek ... 33
Obrázek 25 Umístění pánve do jednotky odplynění ... 34
Obrázek 26 Detail stroje během cyklu ... 34
Obrázek 27 Odebrání vzorku pro vyhodnocení naplynění ... 35
Obrázek 28 Umístění vzorku do vakuové jednotky ... 36
Obrázek 29 Nastavení vakuovací jednotky ... 36
Obrázek 30 Vyjmutí a ochlazení vzorku slitiny ... 37
Obrázek 31 Vážení vzorku na vzduchu a ve vodě ... 37
Obrázek 32 Výsledná hustota vzorku ... 38
Obrázek 33 Změna nastavení programu v PLC ... 42

Obrázek 34 Detail nastavení průtoku 43
Obrázek 35 Experimentální vzorky 44
Obrázek 36 Hustota vzorků při nastavení faktorů na 50/60/70/80 % 45
Obrázek 37 Změna průtoku při 60% nastavení času 46
Obrázek 38 Změna průtoku při 70% nastavení času 46
Obrázek 39 Změna průtoku při 80% nastavení času 47
Obrázek 40 Změna času při 60% nastavení průtoku 47
Obrázek 41 Změna času při 60% nastavení průtoku 48
Obrázek 42 Změna času při 80% nastavení průtoku 48

Tabulka 1 Poměry spotřeby hliníku 16
Tabulka 2 Číselné údaje z analýzy výchozího stavu 38
Tabulka 3 Výchozí logika experimentů 41
Tabulka 4 Výsledky výchozího "nultého" měření 43
Tabulka 5 Konečná logika posloupnosti experimentů 44
Tabulka 6 Vyhodnocení experimentů 45
Tabulka 7 Přehled vyčíslitelných úspor 50

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucí práce Ing. Vladimíře Schindlerové Ph.D. za poskytnuté cenné rady a také společnosti Brembo Czech s.r.o., jmenovitě Ing. Miroslavu Dostálovi a Ing. Martinovi Kubnému za ochotu a vstřícnost při poskytování potřebných informací a za pomoc při řešení této bakalářské práce.

Bc. Jan Večeřa