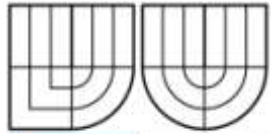




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZVYŠOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ  
ODLITKŮ ZE SLITIN AL ZHOTOVENÝCH  
METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU  
INCREASING OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM CASTINGS MADE BY  
LOST WAX TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JIŘÍ NĚMEC**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Prof. Ing. MILAN HORÁČEK, Csc**

*BRNO 2012*

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Němec

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Zvyšování mechanických vlastností odlitků ze slitin Al zhotovených metodou vytavitelného modelu**

v anglickém jazyce:

#### **Increasing of mechanical properties of aluminium castings made by lost wax technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie vytavitelného modelu je jednou z metod vhodných pro výrobu vysoce přesných odlitků, u kterých se očekává kromě dosažení požadovaných úzkých rozměrových tolerancí konečného odlitku také dosažení jeho co nejvyšších mechanických vlastností (především pevnosti v tahu a tažnosti). Toho je možné dosáhnout jednak ovlivňováním krystalizace a tím vzniku požadované struktury a také následným tepelným zpracováním. Zde se jako velmi progresivní postup ukazuje u odlitků ze slitin Al metoda HIP (High Isostatic Pressure), kdy za současného působení vysokého tlaku a teploty dochází u odlitku ke zhutnění jeho struktury a tak k výraznému nárůstu jeho mechanických hodnot.

Cíle diplomové práce:

Optimalizace především závěrečných technologických fází při zhotovení vybraného odlitku ze slitiny Al metodou vytavitelného modelu za účelem zvýšení jeho mechanických vlastností. Experimentální část orientovat na zjištění možností ovlivňování krystalizace tuhnoucí slitiny Al ve skořepinové formě a především možností dodatečného tepelného zpracování včetně aplikace metody HIP.

Seznam odborné literatury:


- [1] BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
- [2] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
- [3] CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
- [4] HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.–3.6.2009.
- [5] HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology – Zmožnosti tehnologije precizijskega litja. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
- [6] HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 17.1.2011



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

**ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá zvyšováním mechanických vlastností hliníkových odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu pomocí technologie HIP (Izostatické lisování za tepla). Porovnáním mechanických vlastností samostatně litých zkušebních tyčinek a vypreparovaných zkušebních tyčinek z odlitku pro jednotlivé druhy výroby. Bylo prokázáno, že technologie HIP má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti odlitků, především na tažnost.

**Klíčová slova**

přesné lití, HIP (izostatické lisování za tepla), mechanické hodnoty, tepelné zpracování

**ABSTRACT**

This diploma thesis is concerned with improving the mechanical properties of aluminium castings produced using investment casting technology by HIP (Hot Isostatic Pressing). Comparing the mechanical properties of separately casted test bars and integrally casted test bars for individual types of production. It was demonstrated that HIP technology has a positive effect on mechanical properties of castings, especially for ductility.

**Key words**

Investment casting, HIP (Hot isostatic pressing), mechanical properties, heat treatment

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NĚMEC, J. *Název: Zvyšování mechanických vlastností odlitků ze slitin Al zhotovených metodou vytavitelného modelu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 93 s., 5 příloh. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Zvyšování mechanických vlastností odlitků ze slitin Al zhotovených metodou vytavitelného modelu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 25.5.2012

.....

Jiří Němec

**Poděkování**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti Alucast, s.r.o a celému kolektivu za pomoc, rady a podporu při zpracování diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu během celého studia.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	6
Obsah .....	8
1 Úvod.....	11
1 Cíl diplomové práce .....	12
2 Teoretická část .....	13
2.1 Technologie vytavitelného modelu .....	13
2.1.1 Historie technologie vytavitelného modelu .....	13
2.1.2 Popis technologie vytavitelného modelu .....	14
2.2 Slitiny hliníku.....	18
2.2.1 Strukturní složky ve slitinách hliníku.....	18
2.2.2 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$ .....	19
2.2.3 Růst primární fáze – morfologie tuhnutí .....	20
2.2.4 Krystalizace eutektika ve slitinách Al-Si .....	21
2.2.5 Slitiny Al-Si-Mg.....	22
2.3 Možnosti ovlivnění konečných vlastností odlitku.....	23
2.3.1 Odplynění taveniny.....	23
2.3.2 Očkování slitin hliníku.....	23
2.3.3 Vliv rychlosti ochlazování a metalurgického zpracování kovu na pórovitost .....	26
2.3.4 Technologie Hot Isostatic Pressing .....	27
2.3.4.1 Historie .....	26
2.3.4.2 Popis technologie HIP .....	27
2.3.4.3 Schéma zařízení .....	28
2.3.4.4 Cyklus HIP .....	30
2.3.4.5 "Piggypacking" (shromažďování dávek) .....	33
2.3.4.6 Výhody technologie HIP .....	33
2.3.4.7 Densal .....	36
2.3.5 Tepelné zpracování odlitků.....	38
2.4 Zkušební metody .....	43
2.4.1 Měření naplynění (Metoda dvojího vážení) .....	43



2.4.2 Měření tvrdosti.....	44
2.4.3 Radiografie (RTG) .....	45
2.4.4 Zkouška tahem.....	46
2.4.5 Metalografie.....	47
3 Experimentální část .....	48
3.1 Popis experimentu.....	48
3.2 Výroba odlitků a zkušebních těles .....	50
3.2.1 Výroba voskového modelu .....	50
3.2.2 Výroba skořepinové formy a vytavování.....	52
3.2.3 Příprava taveniny a žíhání skořepinové formy.....	54
3.2.4 Odlévání.....	59
3.2.5 Odstraňování skořepinové formy a vtokové soustavy .....	61
3.2.6 Zkouška optimálního tepelného zpracování .....	63
3.2.7 Vyhodnocení optimálního tepelného zpracování.....	64
3.2.8 HIP technologie.....	65
3.2.9 Tepelné zpracování odlitku.....	65
3.3 Měření sledovaných veličin.....	66
3.3.1 Měření tvrdosti.....	66
3.3.2 Metalografie (měření DAS).....	67
3.3.3 Tahová zkouška jednoosým tahem .....	69
4 Vyhodnocení výsledků experimentu .....	71
4.1 Vyhodnocení RTG snímků – před a po HIP.....	71
4.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů (DAS).....	73
4.3 Vyhodnocení mechanických vlastností samostatně litých a vypreparovaných tyčinek .....	78
4.3.1 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných .....	79
tyčinek – přirozené ochlazování.....	79
4.3.2 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných .....	81
tyčinek – JF casting .....	81
4.3.3 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných .....	83
tyčinek – JFK casting.....	83
5 Závěr .....	86
Seznam použitých zdrojů .....	89

Seznam použitých zkratek a symbolů .....	92
Seznam příloh .....	94

## 1 ÚVOD

Výroba hliníkových odlitků technologií vytavitelného modelu nabízí široké možnosti uplatnění této technologie v jednotlivých průmyslových odvětvích, jako jsou letecký, zbrojní, optický, automobilní a další sofistikované obory. Tato technologie je velmi náročná na dodržování výrobních postupů a finančně nákladná, proto je především používána pro výrobky s vysokou přidanou hodnotou.

Technologie nabízí rozměrovou přesnost odlitků, minimální obrábění, kvalitní povrch, nepřeborné možnosti ve složitosti konstrukce odlitku. Proto je stále více vyhledávána výrobcí náročných výrobků.

Výroba hliníkových odlitků technologií vytavitelného modelu nabízí kromě výše zmíněných základních vlastností, také možnost následného tepelného zpracování a dalších postupů ke zvýšení mechanických vlastností hliníkových odlitků. Následné zpracování hliníkových odlitků a dosahování vyšších mechanických vlastností poskytuje této technologii mnohem větší možnosti v uplatnění v náročných průmyslových odvětvích.

V dnešním silném konkurenčním boji je nezbytné nabízet zákazníkům odlitky kvalitní, za příznivou cenu, v co nejkratších časech a s vlastnostmi, které je schopna dosáhnout pouze malá část výrobců hliníkových odlitků technologií vytavitelného modelu. Proto je nutné, aby se slévárny „přesného lití“ stále pokoušely přicházet s něčím novým, co zlepší vlastnosti jejich odlitků a tím si posilovaly svoji pozici a stávaly se konkurenceschopnější.

## 1 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cíle diplomové práce bylo prokázat, zda-li zařazení technologie Hot Isostatic Pressing (Izostatické lisování za tepla, dále jen HIP) do výrobního procesu výroby hliníkových odlitků metodou vytavitelného modelu pomůže zvýšit mechanické hodnoty.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Technologie vytavitelného modelu

#### 2.1.1 Historie technologie vytavitelného modelu

Historie metody vytavitelného modelu se datuje již před tisíci lety. Nejčastější využití této metody bylo na výrobu model, bůžků, ozdob a šperků. Na tvorbu modelů byl používán včelí vosk, jíl pro výrobu forem a ruční měchy na dmýchání vzduchu do pecí. Příklady použití této technologie byly nalezeny napříč celým světem, Indie (2500-2000 Př. Kr.), egyptské hrobky Tutanchamona (1333-1324 Př. Kr.), v Mezopotámii, Aztékové a Mayové v Mexiku, Africe, všude byly vyráběny detailní umělecké předměty z mědi, bronzu a zlata. Příklad výrobku z této doby můžeme vidět na obr.2.1 [1]



Obr. 2.1: Ukázky uměleckých odličků vyrobených metodou vytavitelného modelu [3]

Nejstarší známý písemný záznam o metodě vytavitelného modelu (Schedula Diversarum Artium) byl napsán kolem roku 1100 Př. Kr. Theophilusem Presbyter, mnichem který popsal různé výrobní postupy, včetně receptu na pergamen. Tato kniha byla používána sochařem a zlatníkem Benvenuto Cellini (1500-1571), který podrobně používá ve své autobiografii popis výroby sochy Perseuse a hlavy Medusy pomocí metody vytavitelného modelu. Tato sochy stojí v Loggia dei Lanzi ve Florencii v Itálii. [2]

Metoda vytavitelného modelu začala být používána v moderní průmyslové praxi v pozdních letech 19. století, kdy ji začali používat zubaři k výrobě korunek a vložek, které popsali Dr. D.Philbrook z Council Bluffs ve státě Iowa v roce 1897. Používání technologie bylo urychleno Dr. Williamem H. Taggartem z Chicaga, kde v roce 1907 popsal vývoj technologie. Také vytvořil voskovou

modelovou směs se skvělými vlastnostmi, rozvíjel materiál pro metodu vytavitelného modelu, také vynalezl tlakový licí stroj. [1]

V roce 1940 během II. Světové války byla zvýšená poptávka po přesných tvarově složitých výrobcích a speciálních slitinách, které nebylo možné vyrobit tradičními výrobními metodami, nebo byly velmi náročné na výrobu. Průmysl začal používat ve velkém měřítku metodu vytavitelného modelu. [1]

Po válce se použití metody vytavitelného modelu rozšířila do mnoha komerčních a průmyslových aplikací, které používaly komplexní součásti. [1]

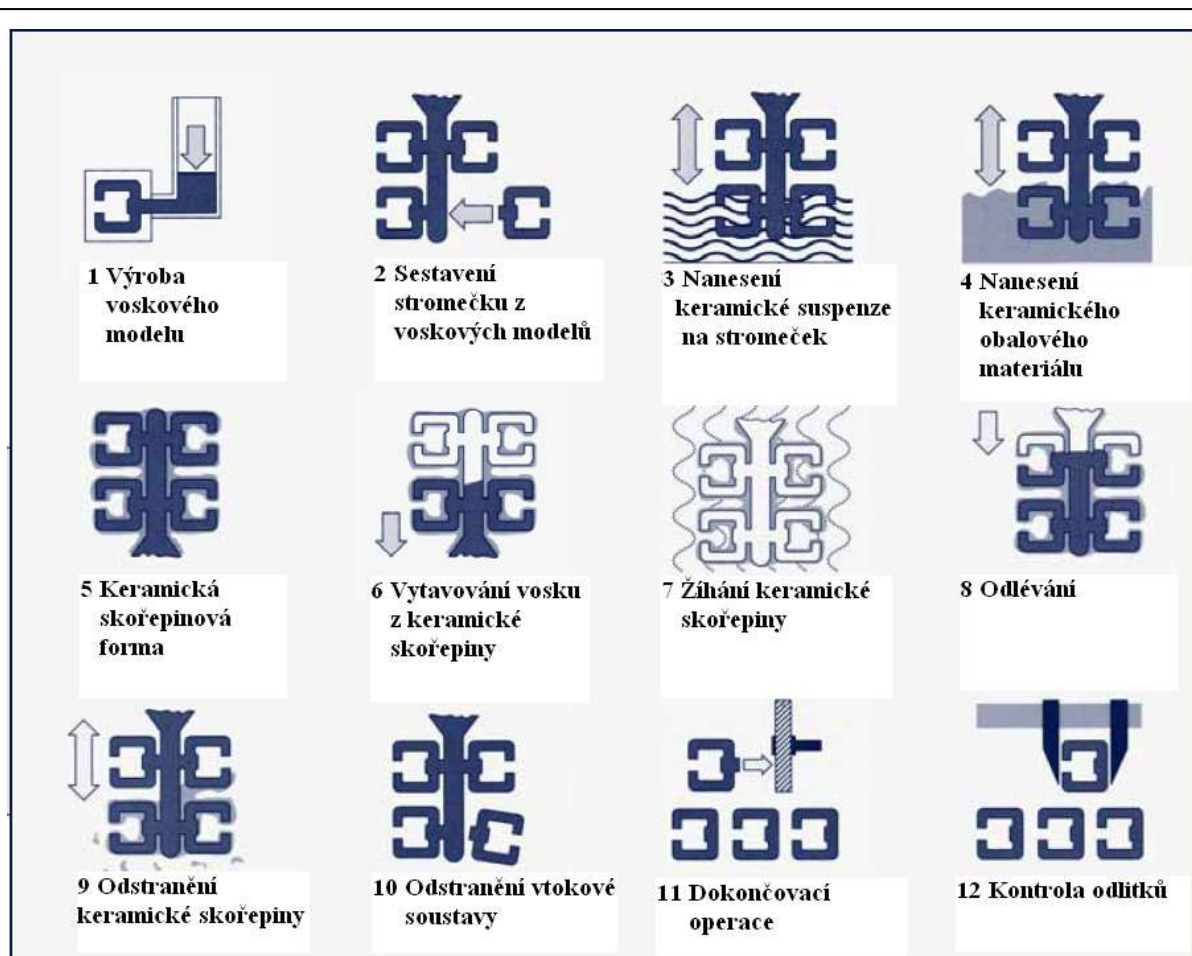
### **2.1.2 Popis technologie vytavitelného modelu**

Technologie vytavitelného modelu („na ztracený vosk“ nebo také „přesné lití“) zaujala bezesporu jedno z předních míst mezi moderními slévárenskými technologiemi. Za posledních více jak 50 let se tato výrobní metoda vyvinula z technologie považované za metodu vysoce specializovanou na technologii v dnešní době běžně rozšířenou, reflektující požadavky zákazníků na odlitky, jak z pohledu tvarové a rozměrové přesnosti, tak i materiálové náročnosti. [4]

Cílem slévačů je stále více výroba odlitků „téměř na hotovo“ („near-net-shape“), tzn. bez nutnosti dalších dokončujících operací. Jedná se tak o poskytnutí odběratelům metody vedoucí k přímé, efektivní a ekonomické výrobě konečné součásti. [4]

Vlastní termín „investment casting“ v anglickém originále (česky „metoda vytavitelného vosku“ nebo také častěji „přesné lití“) vznikl z charakteristiky procesu, kdy na voskový model je postupně nanášena (nanášet – „to invest“) keramická hmota. [4]

Ve stručnosti lze popsat technologii vytavitelného modelu tak, že nejdříve vytvoříme voskový model (vstříkáním vosku do matečné formy), ten se pak spolu s dalšími modely připojí ke vtokové soustavě (také z vosku) a takto vytvořený voskový stromeček se pak postupně obaluje keramickou hmotou. Poté následuje vytavení vosku z keramické formy a její tepelné zpracování žíháním. Odlévá se převážně do žhavých forem. Následují dokončující operace tj. odstranění skořepiny a tryskání povrchu odlitků, které se před touto operací odstraní od vtokové soustavy většinou odřezáním. [4] Na obrázku 2.2 můžeme vidět přehled jednotlivých fází výroby odlitku metodou vytavitelného modelu.



Obr.2.2: Popis technologie vytavitelného modelu [5]

### Zhotovení voskového modelu

Na kvalitě voskového modelu rozhodující měrou závisí kvalita hotového odlitku. Voskový model může být zhotoven gravitačním litím (nad teplotou likvidu vosku), odstříknutím za zvýšeného tlaku (0,5 – 1 MPa) – (těsně pod teplotou likvidu z tzv. napěněného vosku), nebo odstříknutím za působení vyššího tlaku (2,5 – 5 MPa) – (pod teplotou likvidu z těstovitého stavu). Matečné formy, ze kterých se modely vyrábí jsou většinou kovové. Vyrábí se obráběním, odléváním, galvanoplasticky nebo metalizováním. [4]

### Sestavení voskových modelů

Děje se tak po „vyzrání“ (stabilizaci) voskového modelu (min. 24 hod.), kdy se drobnější modely sestavují do tzv. „stromečků“ pomocí pájení nebo lepení. Tvar stromečku ovlivňuje způsob připojení modelů, technika obalování, vytavování, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. Vtoková soustava bývá často vyrobena z regenerovaného vosku (tj. nikoliv z vosku nového - panenského). [4]

**Obalování modelů**

Provádí se postupným ponořením modelu (stromečku) do obalové keramické suspenze. Ta sestává z pojiva (alkoholy nebo hydrosoly) a plniva. Po vytažení modelu z obalové hmoty a jejím optimálním okapaní se na model nanáší posypový materiál – ostřivo, buď fluidním nebo sprchovým způsobem.[4]

**Sušení obalů**

Jednotlivé obaly se suší na vzduchu (řízená teplota, vlhkost a proudění) nebo působení plynného činidla (čpavku). [4]

**Vytavování modelové hmoty**

Provádí se:

A) Za vysoké teploty

- vložením do pece o teplotě min. 750°C s následným žíháním na 900 – 1000°C

B) Za nízké teploty

- ve vroucí vodě

- v autoklávu v přehřáté páře (0,3 – 0,6 MPa, t = 135 – 165 °C)

- dielektrickým ohřevem (ohřev navlhčené skořepiny umístěné v poli vysokofrekvenčních oscilací)

- proudem teplého vzduchu (do středu voskového modelu) [4]

Při vytavování voskového modelu je důležité, aby se vytvořila dilatační spára (lépe vyjádřeno: vrstva tekutého vosku na hranici forma – voskový model), jež umožní modelu volně dilatovat bez porušení souvislosti skořepiny. Keramická skořepina totiž dilatuje ve srovnání s voskovým modelem podstatně méně a hlavně pomaleji. [4]

**Žíhání skořepiny**

Žíhání skořepiny slouží k převedení amorfní formy vazné vrstvičky SiO<sub>2</sub> na formu krystalickou, při současném odstranění všech těkavých látek. Teplota žíhání bývá v rozmezí 900 – 1000 °C (pro SiO<sub>2</sub>), pro molochit, korund aj. jsou teploty vyšší – 1200 – 1400 °C. [4]

**Odlévání**

Odlévání se provádí buď na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Keramické formy jsou při lití buď na teplotě 700 – 800 °C (těsně po vytažení z žíhací pece – tzn. lití do žhavých forem) nebo na teplotě okolí (lití



do studených forem – nelze aplikovat u forem křemenných pro nebezpečí jejich popraskání při chladnutí v důsledku transformace křemene při 572 °C). [4]

#### **Dokončovací operace**

Po odlévání je potřeba odstranit keramickou skořepinu. K tomu slouží tryskání. Jako tryskací médium se používá litinová drť, nerezové kuličky, korund, voda. Další operací je odstranění vtokové soustavy, většinou pomocí pásových pil. Následují finální operace, jako jsou broušení, zavařování, tepelné zpracování, kalibrace, finální tryskání, obrábění částí odlitku, povrchové úpravy a další.

#### **Kontrola odlitků**

Finální procedurou výroby odlitků metodou vytavitelného modelu je kontrola. Zahrnuje mnoho kontrolních metod: vizuální kontrola, rozměrová kontrola, RTG kontrola, penetrační zkouška, zkouška těsnosti, zkouška tvrdosti, zkouška mechanických vlastností atd.

## 2.2 Slitiny hliníku

### 2.2.1 Strukturní složky ve slitinách hliníku

Ve slitinách hliníku bývají přítomny následující strukturní složky:

**Homogenní tuhý roztok hliníku** – označuje se  $\alpha(\text{Al})$ . Jde o substituční tuhý roztok, v němž atomy přísadového prvku nahrazují v kubické plošně centrované mřížce hliníku jeden nebo více atomů Al. Přísadové prvky mají jinou velikost atomů než hliník, proto způsobují deformaci původní mřížky. To má za následek nárůst pevnosti slitiny, současně však snížení plastických vlastností. [6]

**Eutektikum** – je tvořeno fází  $\alpha(\text{Al})$  a čistým přísadovým prvkem, nebo jeho sloučeninou (intermetalickou fází). Vzniká u slitin, u nichž množství některého z přísadových prvků je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v  $\alpha(\text{Al})$  při teplotě tuhnutí. Tuto podmínku splňují všechny slévárenské slitiny Al-Si, neboť jejich obsah křemíku je vždy vyšší, než hodnota maximální rozpustnosti křemíku v hliníku 1,65 % Si. Množství eutektika a jeho morfologie rozhoduje o mechanických a slévárenských vlastnostech slitiny. [6]

**Intermetalické fáze** – jsou strukturní složky s vlastní krystalickou strukturou. Jedná se o chemické sloučeniny, které vznikají z přítomných přísadových a doprovodných prvků, když jejich obsah přesáhne jejich rozpustnost v základním kovu. Intermetalické fáze vznikají v různých etapách krystalizace a to: [6]

- krystalizací z taveniny během tuhnutí slitiny
- peritektickou reakcí
- rozpadem tuhého roztoku (precipitací)

**Intersticiální sloučeniny** – vznikají, jestliže se atomové poloměry složek liší o více než 15 %. Tyto sloučeniny mají vysoký bod tání. [6]

Slévárenské slitiny hliníku mají téměř vždy heterogenní strukturu. To znamená, že vedle primární fáze  $\alpha(\text{Al})$  je ve struktuře rovněž eutektikum nebo/a některé intermetalické fáze. [6]

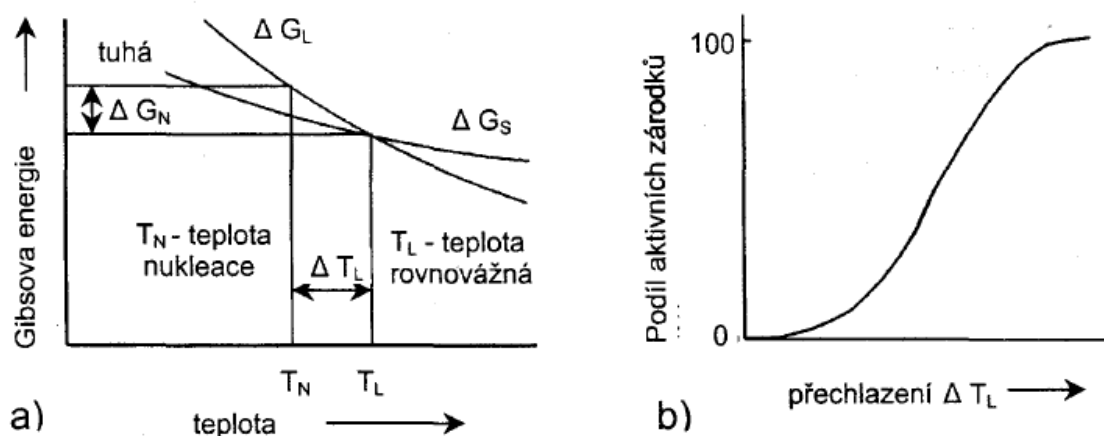
### 2.2.2 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

Převážná většina slévárenských slitin hliníku má podeutektické složení a jejich krystalizace proto začíná vznikem primární fáze  $\alpha(\text{Al})$ . [6]

#### Nukleace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

V technických slitinách dochází ke krystalizaci této fáze mechanismem heterogenní nukleace na cizích zárodcích. Jako krystalizační zárodky mohou působit zejména oxidy a spinely. [6]

Čím větší je podobnost strukturní stavby mezi cizí částicí a hliníkem, tím efektivněji částice působí jako zárodek pro krystalizaci hliníku a tím menší je potřebná aktivační energie pro růst zárodka. Aktivační energie  $\Delta G_N$  pro vznik zárodků je přímo úměrná hodnotě přechlazení pod rovnovážnou teplotu tuhnutí  $\Delta T_L$  – obr. 2.3.a. Při větší aktivační energii se aktivují i energeticky méně výhodné zárodky. Proto čím větší je přechlazení, tím se zvětšuje množství aktivních zárodků – obr. 2.3.b. [6]



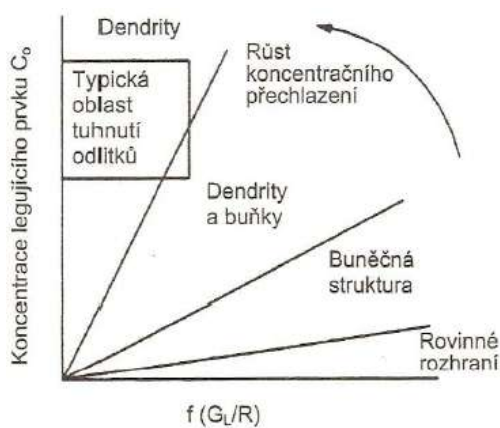
Obr. 2.3 Aktivační energie pro nukleaci aktivních zárodků a vliv přechlazení na jejich počet [6]

Zvýšení počtu vhodných krystalizačních zárodků se provádí očkováním taveniny nebo rychlým ochlazováním. Princip působení těchto zásahů se podstatně liší: [6]

- při očkování se zvyšuje množství vhodných zárodků pomocí očkovacích přípravků, k nukleaci dochází při malém přechlazení [6]
- při rychlém ochlazování slitiny dochází k velkému přechlazení pod rovnovážnou teplotu, kdy se v tavenině aktivují i zárodky energeticky méně výhodné. [6]

### 2.2.3 Růst primární fáze – morfologie tuhnutí

Po nukleaci krystalizačních zárodků dochází k jejich růstu do volné taveniny. Růst probíhá do doby, než je omezen sousedními krystaly. Oblast struktury, která vznikla z jednoho krystalizačního zárodku se nazývá primární zrno. Slitiny s velkým množstvím vhodných zárodků proto tuhnou jako jemnozrné. Způsob růstu primárních krystalů hliníku je závislý na obsahu přísadového prvku –  $C_0$ , na vzniku a velikosti koncentračního přechlazení (obr.2.4).[6]

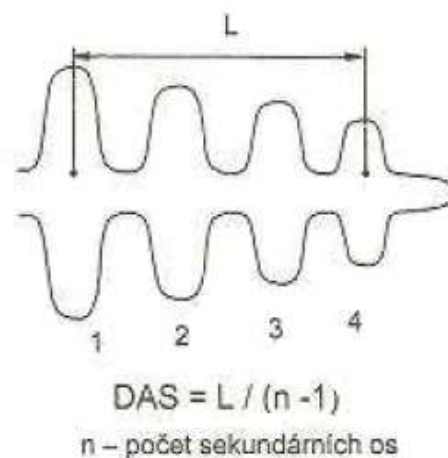


Obr. 2.4: Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení [6]

Tuhnutí odlitků probíhá obvykle v podmínkách, kdy velikost koncentračního přechlazení je poměrně velká a chemické nehomogenity se nemohou vyrovnat mechanismem buněčného tuhnutí. V tomto případě dochází k tuhnutí mechanismem růstu dendritů.[6]

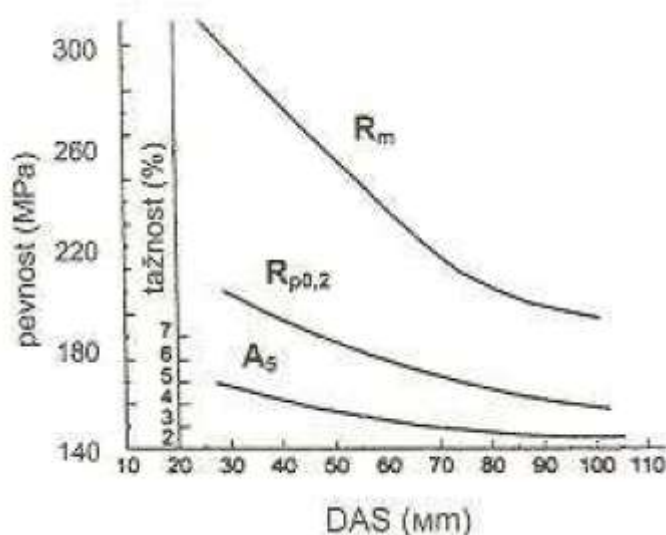
#### Dendritická struktura

Pro popis dendritické struktury je nejdůležitějším kritériem vzdálenost sekundárních os dendritů, označovaná jako DAS (Dendrite Arm Spacing). Hodnoty DAS lze zjistit metalograficky (obr.2.5). Zatímco velikost primárních zrn  $\alpha(\text{Al})$  ve slévárenských slitinách bývá v rozmezí 1-10 mm, hodnoty DAS bývají nejčastěji v rozmezí 10-150  $\mu\text{m}$ . [6]



Obr. 2.5: Metodika měření DAS[6]

Čím jemnější je struktura (tj. menší hodnota DAS), tím menší jsou segregační vzdálenosti. Chemické složení je více homogenní, příznivěji je rozložena mikroporozita. Proto čím menší je hodnota DAS, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti (Obr. 2.6). [6]



Obr. 2.6: Závislost mechanických vlastností slitin na DAS [6]

Hodnota DAS nezávisí na velikosti primárních zrn, nezávisí tedy na stavu krystalizačních zárodků ani na vlivu očkování, nýbrž pouze na rychlosti chladnutí v intervalu tuhnutí – čím kratší doba tuhnutí, tím menší DAS. Tato závislost se obecně popisuje vztahem:[6]

$$DAS = a * t_f^n$$

Kde: a – konstanta, závislá na slitině

n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí <0,3; 0,5>

$t_f$  – místní doba tuhnutí [6]

Zjemnění primární faze při tuhnutí lze dosáhnout buď rychlým ochlazováním, nebo očkováním.[6]

#### 2.2.4 Krystalizace eutektika ve slitinách Al-Si

Slitiny Al-Si nazývané siluminy, mají eutektickou koncentraci křemíku 12,5% Si při eutektické teplotě 577°C. Rozpustnost křemíku při eutektické teplotě je pouze 1,65%. Siluminy se dle množství křemíku dělí na tři skupiny: podeutektické, eutektické a nadeutektické.[6]

### Morfologie eutektika ve slitinách Al-Si

Křemík se ve slitinách Al-Si vylučuje prakticky jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Velikost částic eutektického křemíku může být v rozmezí od méně než 1  $\mu\text{m}$  až po více než 2 mm. V eutektiku se může vylučovat ve třech různých morfologických podobách. Podle tvaru částic křemíku se nazývá i typ eutektika, které může být: [6]

- zrnité
- lamelární
- modifikované [6]

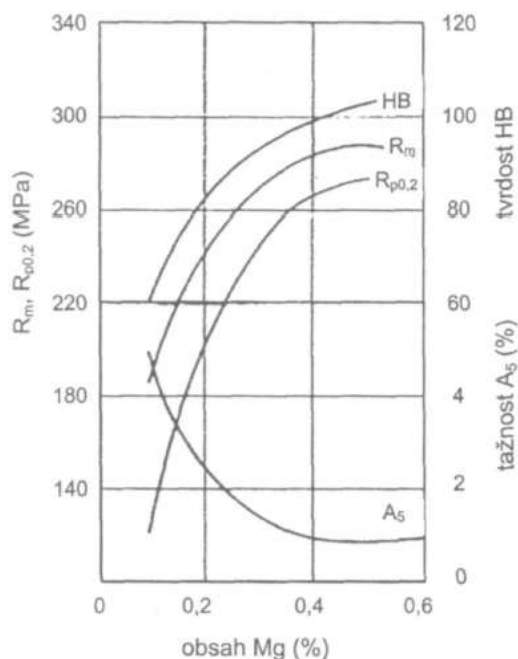
### Struktura eutektika při rychlém ochlazení

Vláknitá modifikovaná struktura může vzniknout nejen vlivem chemických modifikátorů ale rovněž při velmi rychlém tuhnutí s rychlostí postupu krystalizační fronty 400 až 1000  $\mu\text{m/s}$ . Ačkoliv oba mechanismy modifikace jsou principiálně jiné, oba vedou ke zjemnění struktury. [6]

### 2.2.5 Slitiny Al-Si-Mg

Tyto slitiny jsou charakteristické obsahem hořčíku v množství 0,25-0,45 % (u některých slitin až 0,7 %), který umožňuje provádět vytvrzování za tepla. Při běžné rychlosti ochlazení se hořčík ve slitině vylučuje jako fáze  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . V litém stavu mají tyto slitiny jen průměrné vlastnosti, vysoké mechanické vlastnosti získávají až vytvrzováním. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické. [6]

Odlitky ze slitin AlSiMg se používají pro vysoce namáhané výrobky, velmi často v leteckém a v automobilním průmyslu. Po vytvrzení tyto slitiny dosahují vysokých mechanických vlastností  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a HB. Na obr. 2.7 je znázorněn vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti vytvrzené slitiny. [6]



Obr. 2.7 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti [6]

## 2.3 Možnosti ovlivnění konečných vlastností odlitku

### 2.3.1 Odplynění taveniny

Naplynění tavenin hliníkových slitin je vyvoláno absorpcí vodíku, což je jediný plyn, schopný rozpouštět se v těchto slitinách ve velkých množstvích. Jeho zdrojem je vzdušná vlhkost, vlhkost surovin, kelímku, tavících přípravků a nářadí. Protože rozpustnost vodíku v tekutém hliníku je mnohem vyšší než ve fázi tuhé, dochází při tuhnutí slitiny k jeho vylučování ve formě bublin, které výrazně snižují mechanické vlastnosti odlitků. Pro celkové množství vodíku rozpuštěného v tavenině platí Sievertsův zákon. V praxi se za nenaplyněné považují taveniny s obsahem 0,1 - 0,15 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/100g Al. Možnostmi jak odplynit taveninu jsou vakuování nebo probublávání taveniny inertními plyny (N<sub>2</sub>, Ar, ponořování tablet CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) za pomoci jednotek FDU (Foundry Degasing Unit). [7]

### 2.3.2 Očkování slitin hliníku

Velikost zrn primární fáze je jedním z důležitých parametrů, které rozhodují o vlastnostech hliníkových slitin. Každé zrno je tvořeno několika dendrity, které rostou z jednoho krystalizačního zárodku. Velikost zrn ve slitinách hliníku se obvykle pohybuje v rozmezí 1-10mm. Disperzita dendritů je charakterizována hodnotou DAS, která bývá v mezích 10 až 150 μm. Význam velikosti primárního zrna na vlastnosti slitiny je tím větší, čím více je ve slitině primární fáze. Jedná se tedy zejména o slitiny Al-Cu (které obsahují pouze primární fázi) a slitiny Al-Si s nižším obsahem křemíku. S rostoucím obsahem křemíku se zvyšuje obsah eutektika, proto převažuje vliv tvaru eutektického křemíku a vliv disperzity primární fáze je menší. [6]

Při intenzivním ochlazování dochází k velkému přechlazení taveniny pod rovnovážnou teplotu krystalizace, při němž se aktivují i méně příznivé nukleací zárodky. Výsledkem je získání jemnozrnné struktury bez jakýchkoliv metalurgických zásahů. Tento mechanismus zjemnění zrna je typický pro tenkostěnné odlitky a odlitky lité do kovových forem. Očkování primární fáze α(Al), která je vedoucí fází krystalizace většiny hliníkových slitin. [6]

**Princip očkovaní podeutektických slitin hliníku**

Účelem očkovaní je zjemnění primární fáze vnášením nukleačních zárodků, resp. látek, z nichž se nukleační zárodky tvoří. Protože se očkovaním nemění intenzita ochlazování, nemění se v podstatě ani hodnoty DAS. Proto je účinek očkovaní na vlastnosti slitin menší, než účinek rychlého chladnutí. [6]

Očkovaní podeutektických slitin hliníku se provádí titanem nebo kombinací titanu a bóru. Tyto prvky se do taveniny vnášejí pomocí očkovacích solí (např.  $K_2TiF_6$ ,  $KBF_4$  a dalších), očkovacích tablet nebo v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B. [6]

Očkovací tablety obsahují směs očkovacích solí v různých kombinacích a koncentracích tak, aby jejich účinek byl optimální pro určitý typ slitin. Dávkují se obvykle v množství 0,1-0,4 % hmotnosti taveniny. [6]

V očkovacích předslitinách Al-Ti bývá obsah titanu obvykle do 5 %. Titan je v nich již přítomen jako intermetalická fáze  $TiAl_3$ . Čím jemnější disperzita  $TiAl_3$ , tím účinnější je očkovací účinek předslitiny. Pro efektivní zjemnění primární fáze  $\alpha(Al)$  je nutno do taveniny vnést asi 0,02-0,1 % Ti. [6]

Zárodky  $TiAl_3$  se v naočkované tavenině postupně rozpouští a očkovací účinek s časem odeznívá. Efektivní očkovací účinek předslitin Al-Ti obvykle trvá kolem 30-45 minut. [6]

Dalšího zlepšení očkovacího účinku se dosahuje očkovadly s obsahem Ti a B. Předslitiny s Ti a B obvykle obsahují do 5 % Ti a do 1 % B v různých poměrech. Bór sám nepůsobí jako očkovadlo, vždy pouze v kombinaci s titanem. S hliníkem a titanem tvoří bór intermetalické fáze  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  s velikostí 0,5-2  $\mu m$ , tedy mnohem menší než samotný  $TiAl_3$ . Tyto částice pak slouží jako krystalizační zárodky. Zejména  $AlB_2$  má očkovací účinek již při velmi malém přechlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu a proto působí i při pomalém ochlazování. Účinek očkovacích slitin souvisí s morfologií těchto intermetalických částic. Je závislý na koncentraci obou prvků v předslitině a na způsobu její výroby. Vlivem bóru se dosti významně zpomaluje rychlost odeznívání a očkovací účinek dokonce trvá i po přetavení. [6]

Obsah bóru ve slitině by neměl být vyšší, než asi 0,004 % B (to odpovídá max. dávkování asi 0,2 % očkovadla). [6]



**Očkovací prostředky**

Očkovací slitiny se dodávají nejčastěji jako tyče s určitou hmotností (obvykle s rozměry  $\varnothing 10$  mm, délka asi 500 mm). Očkovadlo se přidává ponořením pod hladinu roztavené slitiny, taveninu je pak nutno promíchat. Očkovací účinek se dosáhne velmi rychle a obvykle je možno odlévat bezprostředně po naočkování. [6]

Očkovací soli se přidávají na hladinu taveniny v množství, doporučeném výrobcem (obvykle asi 1 %), zvonem se ponoří ke dnu lázně a promíchají s taveninou. Soli musí být dobře vysušené, aby se jimi do taveniny nevnášela vlhkost. [6]

**Vliv očkování na vlastnosti slitin**

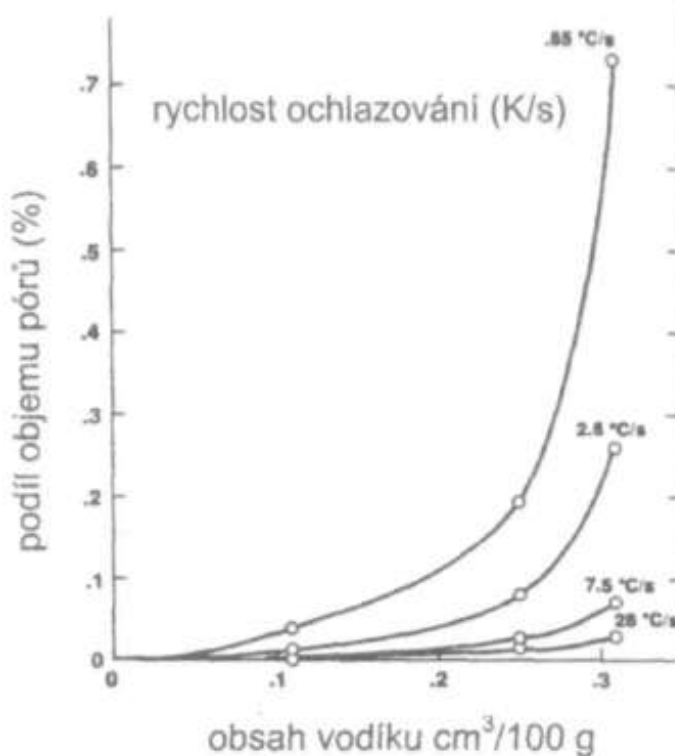
Zjemnění zrna se projeví zlepšením mechanických i mnoha technologických vlastností: [6]

- zvýšením pevnosti a tažnosti,
- snížením sklonu slitiny ke vzniku trhlin,
- menší pórovitosti odlitků,
- zvýšením těsnosti odlitků,
- lepší obrobiteľnosť,
- zlepšením kvality povrchu po anodické oxidaci,
- zvýšením vlastností po tepelném zpracování. [6]

### 2.3.3 Vliv rychlosti ochlazování a metalurgického zpracování kovu na pórovitost

Tvar a poloha pórů ve struktuře kovu závisí zejména na morfologii tuhé fáze, na obsahu plynů a na rychlosti tuhnutí. Při pomalém tuhnutí vznikají velké bubliny. Při rychlém tuhnutí je výsledkem vznik malých kulovitých nebo protáhlých bublin, uzavřených v mezidendritických prostorech kovu – tzv. mikrostaženin. [6]

Čím rychlejší je ochlazování, tím větší je přesycení tuhého kovu, vyloučí se méně plynného vodíku a tím menší je pórovitost (obr.2.8). Rovněž očkování má vliv na množství a rozložení pórů. Zatímco neočkované slitiny mají spíše sklon ke vzniku soustředěných, velkých dutin, vlivem očkování se zvětšuje sklon ke vzniku rozptýlených mikrostaženin. [6]



Obr. 2.8: Vliv obsahu vodíku a rychlosti ochlazování na objem pórů [6]

Pórovitost patří ve slévárnách hliníku k nejrozšířenějším vadám. Tomu také odpovídá fakt, že mnoho zásad tavení a metalurgických operací je zaměřeno na dosažení nízkého stupně naplynění taveniny. Porezita zhoršuje řadu užitných vlastností hliníkových odlitků, zejména: [6]

- pevnostní vlastnosti – snižuje pevnost i tažnost
- únavové vlastnosti – póry jsou iniciačními místy vzniku únavových lomů
- těsnost – pronikání tlakového média stěnou odlitku
- kvalitu obrobení
- povrchovou úpravu odlitků [6]

### 2.3.4 Technologie Hot Isostatic Pressing

HIP neboli Hot Isostatic Pressing (Izostatické lisování za tepla) je technologií s širokou možností aplikace. Ačkoliv tato technologie je již k dispozici několik desetiletí, tak až v posledních dekadách začala být hojněji využívána v mnoha výrobních oblastech. Uvedeme možnosti použití této technologie, její princip a výhody, a využití speciálně pro hliníkové odlitky.

#### 2.3.4.1 Historie

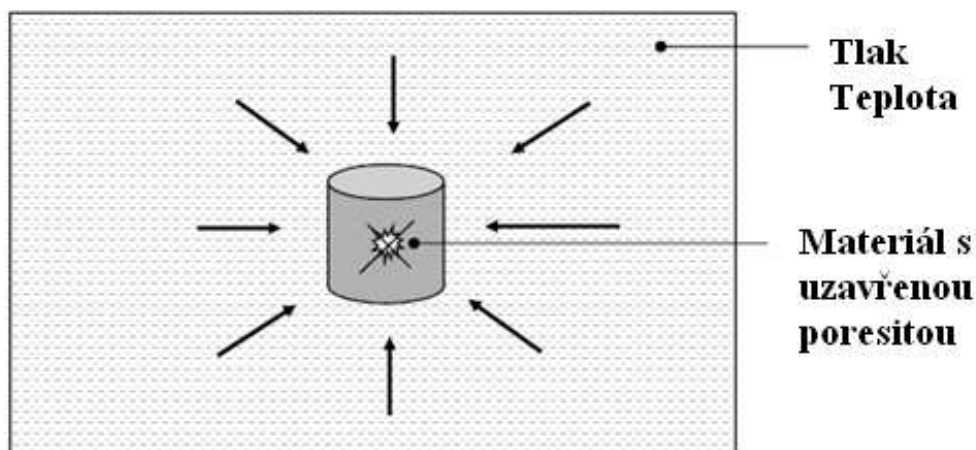
Počátky technologie HIP sahají do roku 1955. Kdy byla týmem vědců z Battelle Memorial Institute of Columbia v Ohiu vynalezena metoda na spojení zirkonia a zirkon-uranové slitiny použité jako článek jaderného paliva. Provedení požadavků na tento typ spojení nemohl být splněn existujícími konvenčními metodami. Tento výzkum vyústil ve výrobu prvního zařízení, které za pomoci tlaku plynu a teploty spojilo dané materiály. Jednalo se o palivové články do tlakovodního reaktoru pro společnost Westinghouse.[8]

Ve stejném čase byla ve Švédsku společností ASEA (nyní Avure) použita vysokotlaký proces na výrobu prvního syntetického diamantu na světě, přeměnou grafitu na diamant tlakem přibližně 1 milion psi (7000 MPa). Nádoba s vinutým drátem a rám byly následně vyvinuty a to v roce 1962, patent pro tuto pokrokovou tlakovou nádobu byl přisouzen Baltzar Von Platen ze společnosti ASEA. [8]

V šedesátých letech si mnoho společností uvědomilo potenciál užití HIP technologie komerčním způsobem na zlepšení práškových komponent. V roce 1965 byl tento proces použit pro zvýšení únavové životnosti litých pístů spalovacích motorů z hliníkových slitin. V roce 1967 byl zaveden pro zvýšení jakosti odlitků ze slitin titanu a z žárovečných slitin niklu pro letecký průmysl. [9]

### 2.3.4.2 Popis technologie HIP

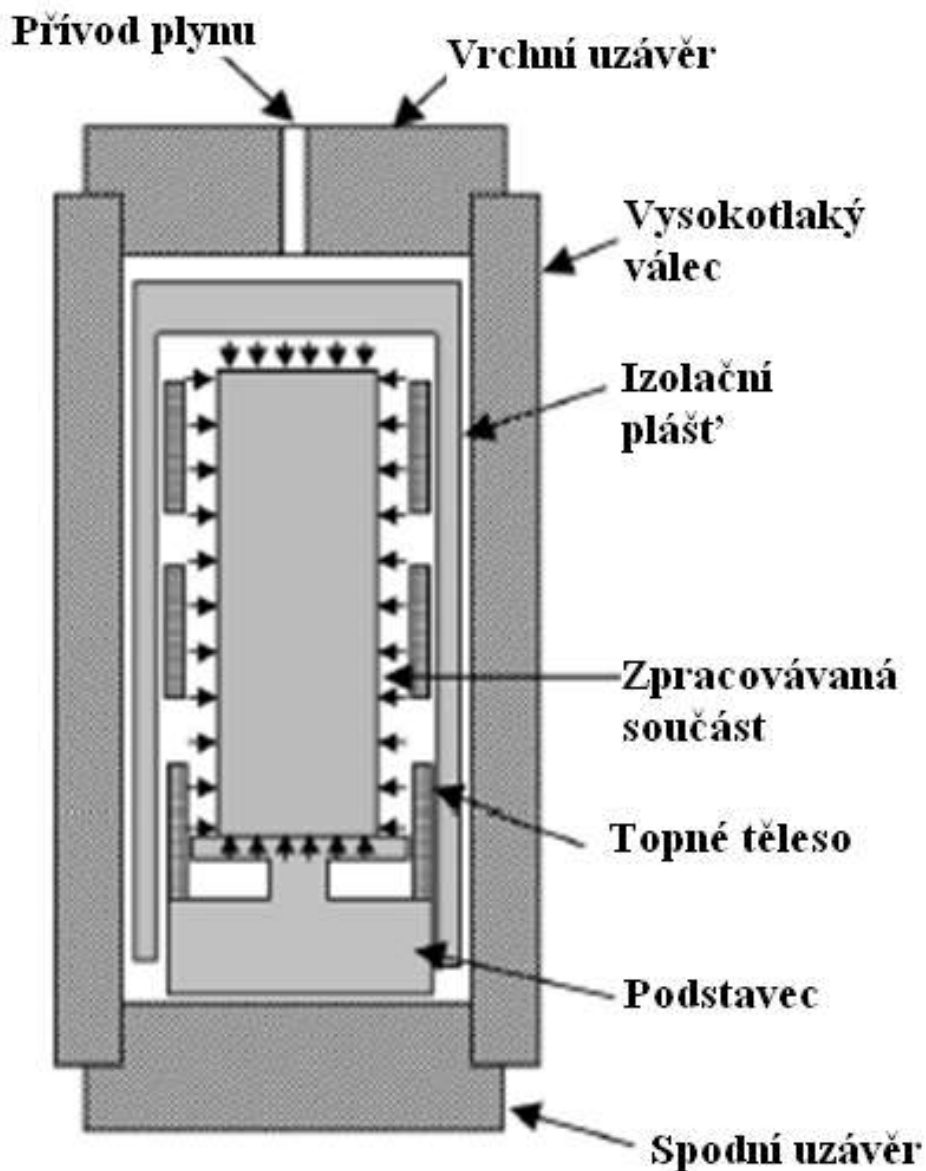
Technologie HIP je technologie tváření a zhušťování za použití ohřátého plynu (nejčastěji Argonu a Dusíku) za působení vysokého tlaku. Na místo mechanické síly, která stlačuje těleso z jedné nebo dvou stran, je technologie HIP založena na působení tlaku na těleso ve všech směrech. Tudíž dochází k odstranění vnitřních pórů, aniž by se změnil tvar tělesa v jakémkoliv směru. Tento proces může být použit pro úpravu kovových, keramických a kompozitních dílů a pro zhutnění (slinování) práškových materiálů umístěných v kontejnerech o výsledném tvaru. Maximální používaný standardní tlak se pohybuje od 100 do 300 MPa. Teploty během procesu mohou být až nad 2000°C. Vyšší tlaky a teploty mohou být používány pro provádění speciálních aplikací. [8]



Obr.2.9 Působení tlaku a teploty na těleso ve všech směrech [10]

### 2.3.4.3 Schéma zařízení

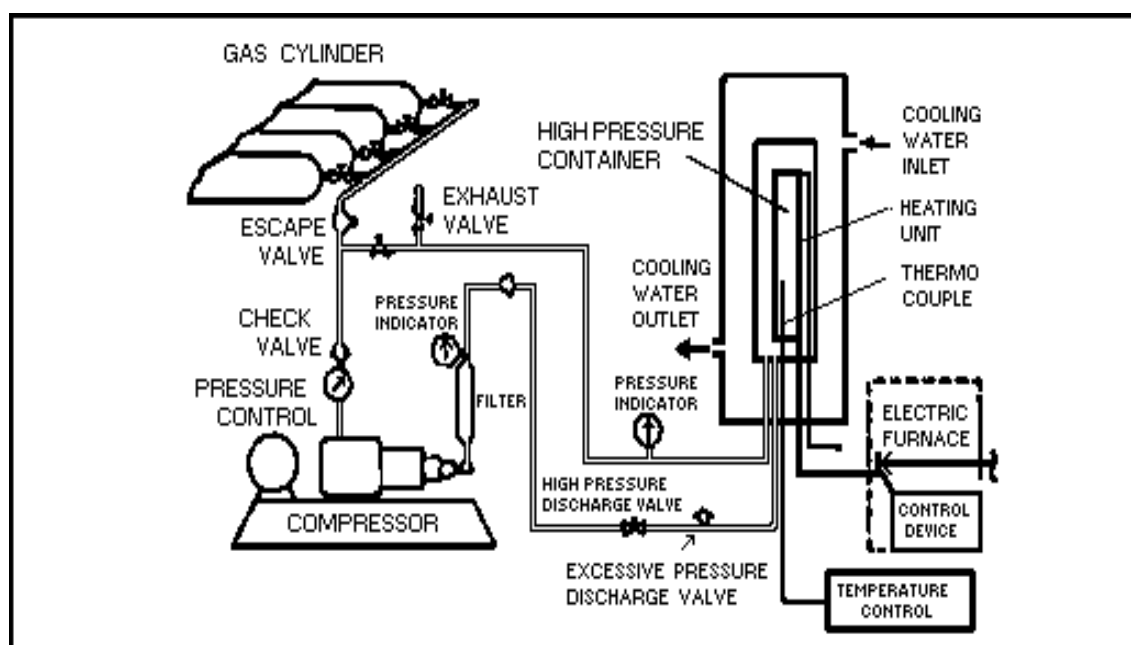
Zařízení pro HIP technologii se skládá z několika hlavních částí. Jsou jimi nádoba (koš) na ukládání součástí na technologii HIP, topné těleso, izolační plášť, vysokotlaková nádoba, přívod plynu, spodní a horní uzávěry.



Obr.2.10 Základní schéma HIP jednotky [11]

HIP jednotka popsaná a zobrazená výše je relativně co do počtu komponent, z kterých je složena jednoduchá. Ovšem vzhledem k tomu, že se při této technologii pracuje s vysokými tlaky a teplotami je součástí celé výrobní technologie HIP mnoho dalších zařízení. Jedná se především o zařízení pro chlazení HIP jednotky, která je vystavována při provozu vysokým teplotám,

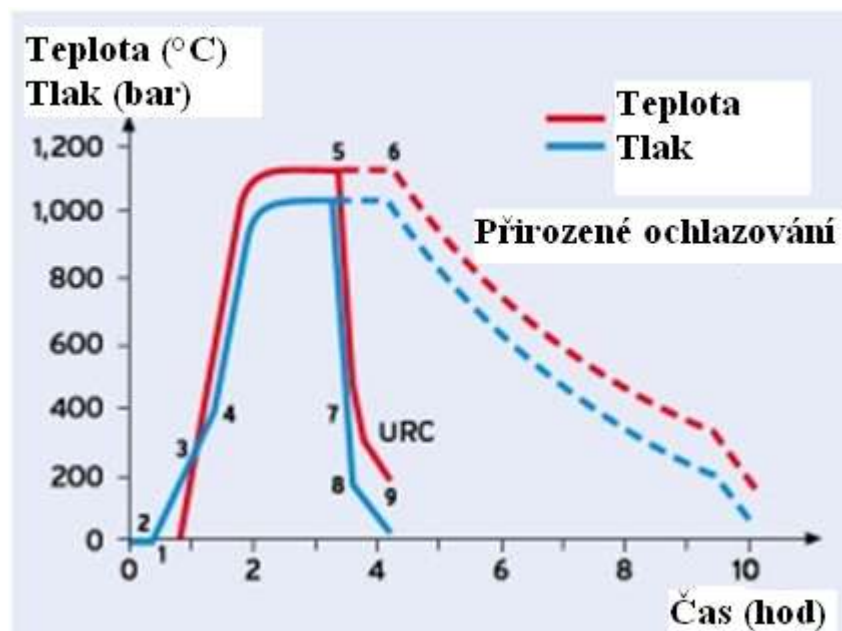
tudíž musí být ochlazována, aby zařízení vydrželo tyto zatížení. Dalším souborem zařízení je obsluha zásobování jednotky plynem ze zásobníků a jeho opětovného odebírání z jednotky. Vzhledem k množství a ceně používaných plynů je řešen zpětný odběr z jednotky a jeho skladování pro další použití, aby se snížili provozní náklady. Další zařízení, na němž je založena podstata této technologie, je zařízení na ohřev atmosféry v jednotce pomocí topného tělesa. V neposlední řadě jsou součástí zařízení kontrolní a měřící zařízení, která sledují tlaky, teploty, množství plynu, průběh HIP cyklu a další veličiny pro snadný a jednoduchý chod zařízení. [11]



Obr.2.11 Schéma důležitých prvků zařízení [12]

#### 2.3.4.4 Cyklus HIP

Průběh HIP cyklu je v podstatě stejný pro všechny součástky, které touto technologií projdou. Jedná se o náběh teploty a tlaku na určitou hodnotu a výdrž na daných parametrech po stanovenou dobu. Poté následuje pomalé či rychlé ochlazení a snižování tlaku plynu. Schéma cyklu můžeme vidět na obr. 2.12. Jsou zde zobrazeny dva typy cyklů klasický a zrychlený (URC – Uniform Rapid Cooling) vyvinutý společností Avure.



Obr.2.12 Schéma HIP cyklu [13]

Cyklus URC od společnosti Avure pomocí rychlého ochlazení může snížit celkovou dobu cyklu, zvýšit produktivitu zařízení a kombinovat HIP technologii s tepelným zpracováním. Umožňuje jednoduše ochladit celý objem pracovního tělesa ve střední HIP jednotce z 1260°C na 300°C za méně než 30 minut. V porovnání s klasickým HIP cyklem přirozeného chladnutí, které může trvat od 8 do 12 hodin, což je až polovina HIP cyklu. Ochlazování pece je vybaveno systémem s nucenou konvekcí chladícího plynu skrz pracovní zónu a přenos tepelné energie z tohoto pracovního prostoru pryč pomocí kombinace plyn-plyn, plyn-voda do tepelného výměníku. Takto může být celkový čas cyklu snížen o cca 50%. Společnost Avure navrhuje jednotky URC tak, aby ochlazování v celém pracovním prostoru bylo jednotné a minimalizovaly se tepelné deformace a nerovnoměrný růst zrn. [13] Cyklus HIP je pro každý materiál

jiný. Teplota se u každého materiálu pohybuje lehce pod teplotou tavení, aby se docílilo plastického stavu materiálu a mohlo dojít k difuzním pochodům v materiálu za pomoci působení tlaku. Na následujících obr. 2.13 a 2.14 jsou uvedeny přibližné teploty a tlaky pro jednotlivé materiály zpracovávané technologií HIP.

Materials to HIP	Temperature (°C)	Pressure (MPa)
High-speed steel powder	1.000–1.200	~100
Ni base superalloy	1.170–1.280	100–150
Ti alloy (Ti-6Al-4V)	800–960	~100
Cr	1.200–1.300	~100
Cu alloy	500–900	~100
Al alloy	350–500	~100
Cemented carbide (WC–Co)	1.300–1.350	30–100
TiBaO <sub>3</sub>	100–1.200	~100
PZT	950–1.150	~100
Ni-Zn-ferrite	1.050–1.180	~100
Mn-Zn-ferrite	1.180–1.250	~100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.350–1.450	~100
Y-PSZ (Yttria partially stabilized zirconia)	1.350–1.500	~100
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.700–1.800	~100
SiC	1.950–1.050	100–200

Obr.2.13 Přehled materiálů a jejich teplot a tlaků pro HIP [11]

Material	Melting Point $T_m$ (°C)	Yield Stress at Room Temperature (MPa)	Hipping Temperature (°C)	Hipping Pressure (MPa)
Al and its alloys	660 (Al)	100 to 627	500	100
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	300	350
Cu and its alloys	1083 (Cu)	60 to 960	800 to 950	100
Be and its alloys	1289 (Be)	240	900	103
Nimonic and superalloys	1453 (Ni)	200 to 1600	1100 to 1280	100 to 140
Hydroxyapatite	—	—	1100	200
Mg/Zn ferrite	—	—	1200	100
TiAl	—	—	900 to 1150	35 to 200
Ti <sub>3</sub> Al	—	—	925	200
Ceramic superconductors	—	—	900	100
Steels	1536 (Fe)	500 to 1980*	950 to 1160	100
Ti and its alloys	1670 (Ti)	180 to 1320	920	100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	5000	1500	100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /glass	—	—	1400	100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiC	—	—	1935	150
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub>	—	—	1500	200
SiC	2837	10,000	1850	200
B <sub>4</sub> C	—	—	2000	200
WC/Co	2867	6000	1350	100

\*Low-alloy steels (water quenched and tempered).

Obr.2.14 Přehled materiálů a jejich teplot a tlaků pro HIP [11]



#### **2.3.4.5 “Piggypacking” (shromažďování dávek)**

Vzhledem k tomu, že během jednoho cyklu nelze zpracovávat technologií HIP různé druhy materiálů. A tím se pro mnoho zákazníků stávala tato technologie finančně náročnou, protože nebyli schopni si zaplatit HIP cyklus jen pro svůj materiál. Tak vznikl u provozovatelů nápad na sjednocování jednotlivých malých zakázek pro technologii HIP od zákazníků do jednotlivých „balíčků“, které byly vždy pro daný materiál a jakmile se nashromáždilo dostatečné množství zakázek od daného materiálu byla provedena technologie HIP. Tímto se umožnilo i menším výrobcům využít schopností technologie HIP za přijatelnou cenu. V dnešní době je tato služba zákazníky velmi oblíbená, protože jim umožňuje vylepšit své výrobky a zvýšit svou konkurenceschopnost. Cena cyklu pro daný materiál je účtována dle počtu kilogramů od jednotlivých zákazníků. [14]

#### **2.3.4.6 Výhody technologie HIP**

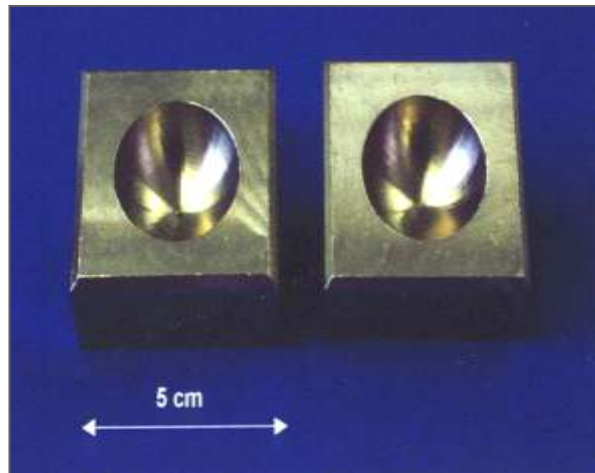
V průběhu let technologie HIP prokázala svou schopnost výrazně zlepšit fyzikální vlastnosti součástí pro vysoce namáhané aplikace. HIP technologie poskytuje následující specifické výhody:

- zpevnění odlitků a dílů vyrobených práškovou metalurgií na 100% teoretické hustoty
- eliminace vnitřních vad a pórů
- zlepšení mechanických vlastností, mezi ně patří zvýšená odolnost proti únavě, opotřebení a otěru a lepší tažnosti [8]

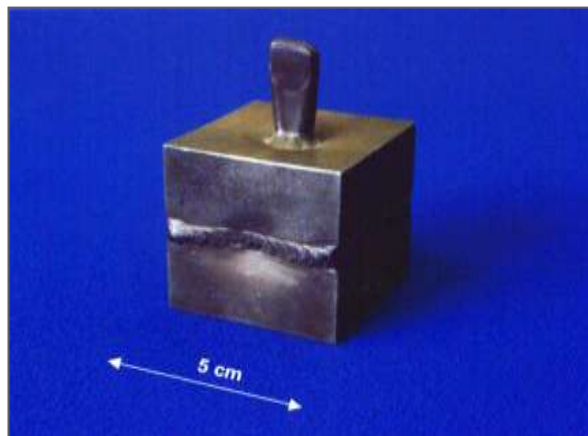
##### **Odstraňování vnitřních vad a defektů**

HIP technologie skrývá v sobě velkou pomoc pro slévárny v podobě úpravy slévárenských defektů, jako jsou staženiny, porezita, vzduchové bubliny a jiné vnitřní vady. Použitím této technologie a odstraněním těchto defektů se docílí zdravoti odlitku v podobě jeho lepší těsnosti, lepších výsledků při kontrole vnitřní kvality odlitku rentgenem, odstraněním porózy, atd. Na níže uvedených obrázcích 2.15, 2.16 a 2.17 můžeme názorně ve zvětšeném modelu vidět co s případnými dutinami, bublinami a jinými vnitřními vadami udělá technologie HIP. Do dvou ocelových bloků o rozměru 5 cm byla vyrobena polovina koule o průměru 3 cm. Tyto dva upravené bloky byly svařeny po

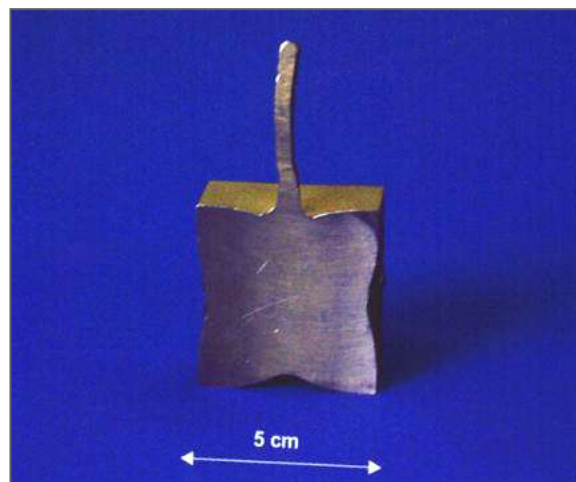
obvodu a díky tomu ve vnitř vznikl pór o průměru 3 cm. Tento blok byl následně zpracován technologií HIP a poté rozřezán na dvě poloviny. Na uvedené polovině modelu je názorně vidět co technologie HIP dokáže s takovými vnitřními defekty udělat.



Obr.2.15 Dva ocelové bloky s vytvořenou kulovou dutinou [15]

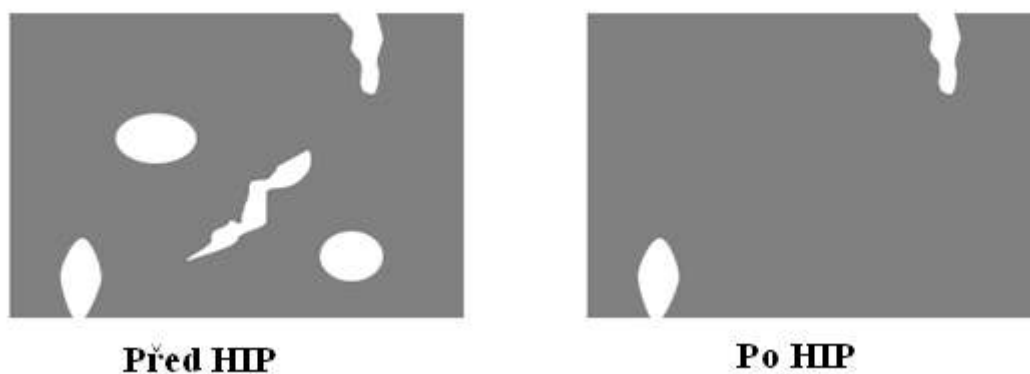


Obr.2.16 Svařené ocelové bloky s vytvořenou dutinou před HIP [15]



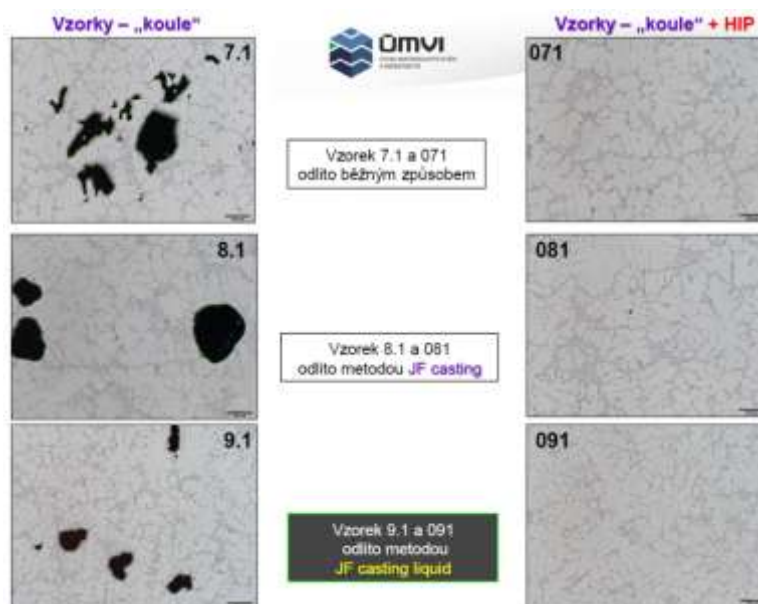
Obr.2.17 Rozřezaný model se zacelenou dutinou po HIP [15]

Zacelení vad na odlitku je možné pouze v případě, že se jedná o vady vnitřní. Pokud vnitřní vada částečně zasahuje do povrchu odlitku nedojde k zacelení této vady. Protože uvnitř je v dané vadě menší tlak a vyvinutím tepla a tlaku na odlitek se pomocí difuzních pochodů tato vada zacelí. Vady, které jsou spojeny s povrchem, a tudíž tlakem v pracovní tlakové nádobě mají stejný tlak, proto nemůže dojít k zacelení vady. Na níže uvedeném obrázku 2.18 je znázorněno, které vady lze zacelit a které již nikoliv.



Obr. 2.18 Vnitřní a vnější vady před a po HIP [15]

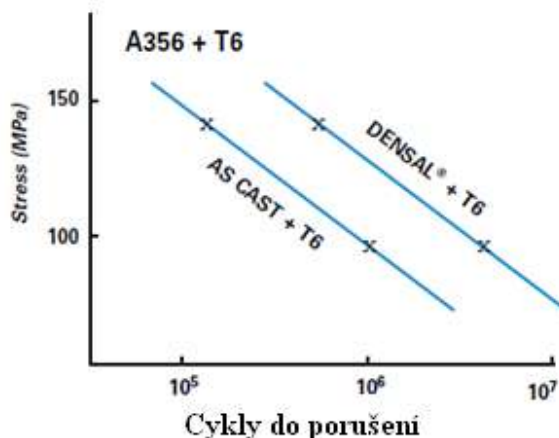
Technologie HIP dokáže plně eliminovat porozitu v odlitku. Práce na toto téma byla v roce 2011 zpracována ve spolupráci společnosti Alucast, s.r.o. a Ústavu materiálových věd a inženýrství. Výsledky této studie prokázaly na vzorcích ze slévárny „přesného lití“ Alucast, s.r.o., že použití technologie HIP dokáže porozitu plně eliminovat. [16]



Obr. 2.19: Vzorky studie použití HIP na eliminaci porosity [16]

### Zlepšování mechanických vlastností a únavy

Technologie HIP má také pozitivní vliv na mechanické vlastnosti a hodnoty cyklické únavy. Níže jsou uvedeny mechanické hodnoty hliníkových slitin bez technologie HIP a s technologií HIP.



Obr.2.20 Nárůst odolnosti proti cyklické unavě [17]

Slitina	Rm [Mpa]		Rp0,2 [Mpa]		A5 [%]	
	bez HIP	po HIP	bez HIP	po HIP	bez HIP	po HIP
A356	193	248	138	172	5,4	6,7
A357	200	255	179	207	2,6	5,8

Tab.2.1 Mechanické hodnoty bez HIP a s HIP [9]

#### 2.3.4.7 Densal

Společnost Bodycote vyvinula speciální výrobní postup technologie HIP pro hliníkové odlitky. Tento výrobní program nese název **DENSAL**. Je složen z **DENS**ification of **Al**uminium, nebo-li „zhušťování hliníku“. [18]

Před vynalezením procesu Densal bylo zpracování technologií HIP hliníkových odlitků příliš drahé. Jedině letecký průmysl si mohl tuto technologii dovolit použít. V 80.letech společnost Bodycote vyvinula Densal a rapidně snížila náklady tak, že mohl být použit pro hliníkové odlitky v závodních motorech automobilů. Po deseti letech vývoje byl vyvinut Densal II, který byl cenově dostupný pro masově vyráběné hliníkové odlitky aut. [18]

Densal II nabízí nákladově efektivní způsob zvýšení únavy a houževnatosti hliníkových odlitků. Pomocí svých rozsáhlých znalostí a zkušeností se zhušťováním odlitků a jejich tepelným zpracováním pro slévárenský průmysl. [18]

Za posledních deset let, prakticky všechny směry vývoje v oblasti hliníkových odlitků byly směřovány na zlepšení mechanických vlastností a tím i

zlepšení kvality odlitků. Nyní díky nižším výrobním nákladům může být Densal II zahrnut do výrobního procesu pro mnohem širší okruh hliníkových odlitků. [18]

Díky začlenění Densal II procesu s prudkým ochlazením a vytvrzováním (T6 – tepelným zpracováním) je optimalizována tepelná účinnost a výkon celého procesu HIP. Začlenění těchto procesů umožňuje lepší kontrolu a optimalizaci mechanických vlastností. [18]



Obr. 2.21 HIP jednotka pro proces Densal II (Ø 1190 x 1390 mm) [15]

Densal II je vhodný pro hliníkové odlitky vyrobené nízkotlakým litím, kokilovým litím, litím do pískových forem, sklopným litím, vakuovým litím, litím na vytavitelný model, litím na vypařitelný model. Odlitky vyráběné metodou tlakového lití nejsou vhodné pro Densal II. [18]

V následující tabulce je srovnání procesu Densal II a běžného HIP procesu. Vzhledem k tomu, že ve většině parametrů je proces Densal II na nižších hodnotách než běžný HIP proces, tak jasně vyplývá jeho menší finanční náročnost. [18]

Parametry	proces DENSAL II	běžný HIP proces
Teplota	teplota tepelného zpracování hliníku	až 1400 °C
Tlak	< 100 MPa	až 200 MPa
Čas cyklu	< 3 hours	>18 hod
Plyn	Dusík	drahý inertní plyn: Argon
Tepelné těleso	Kantal (FeAlCr)	Molybden nebo grafit

Tab. 2.2: Porovnání HIP procesů [19]

### 2.3.5 Tepelné zpracování odlitků

Účelem tepelného zpracování hliníkových slitin je zejména zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřních pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. Lze rovněž zlepšit obrobiteľnosť eventuálně dosáhnout změnu i jiných technologických vlastností nebo korozní odolnosti. [6]

Nejčastějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin je vytvrzování. Při vytvrzování se využívá změny rozpustnosti některých přísadových prvků v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$  během chladnutí. Podle schopnosti slitiny k tomuto způsobu tepelného zpracování se hliníkové slitiny dělí na vytvrditelné a nevytvrditelné. [6]

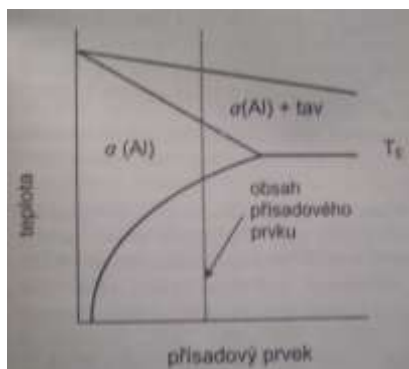
Teplotní režimy jednotlivých druhů tepelného zpracování jsou poměrně významně závislé na chemickém složení slitiny, disperzně výchozí struktury a na tloušťkách stěn odlitků. Žíhací teploty je nutno dodržovat v úzkém teplotním rozmezí. Tolerance teplot obvykle nesmí překračovat rozmezí  $\pm 5 \text{ K}$ , při homogenizačním žíhání se vyžaduje tolerance až  $\pm 3 \text{ K}$ . To vyžaduje používat pece s přesnou teplotní regulací a s vysokou homogenitou rozložení teploty v celém objemu pece. [6]

#### Vytvrzování

Vytvrzování je nejdůležitějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin. Tímto tepelným zpracováním se dosahuje podstatného zvýšení meze pevnosti  $R_m$ , meze  $R_{p0,2}$  a tvrdosti. Tažnost slitin se obvykle poněkud snižuje. [6]

#### Princip vytvrzování

Podmínkou pro vytvrzování je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ . Takovými prvky jsou zejména Cu a Mg, případně Ni nebo Zn. Obsah těchto prvků ve slitině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě ale nižší, než je maximální rozpustnost  $\alpha(\text{Al})$  při eutektické teplotě (obr.2.22). [6]



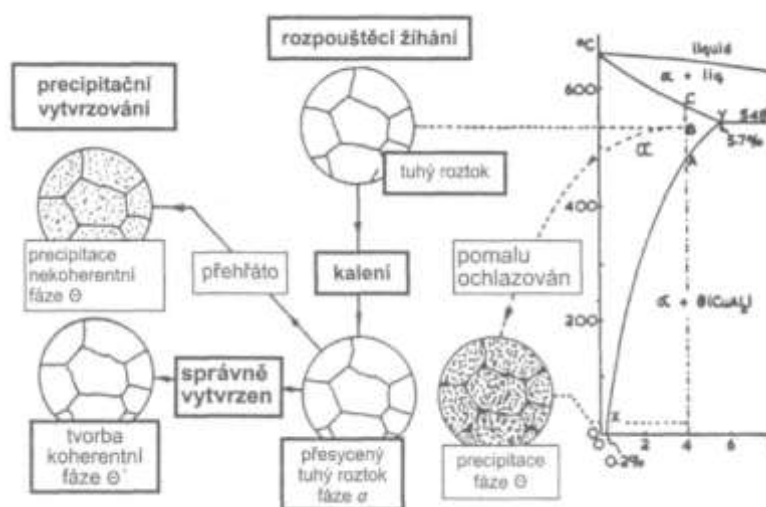
Obr.2.22 Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [6]

Výchozím polotovarem při vytvrzování je odlitek, který ve formě ztuhl běžným způsobem. Při takovém relativně pomalém ochlazení se přísadové prvky vylučují v podobě rovnovážných intermetalických fází např.  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{MgZn}_2$  event. jiných. Takto vyloučené fáze jsou poměrně hrubé a mají nepříznivý vliv na vlastnosti slitiny – zvláště snižují houževnatost. [6]

Cílem vytvrzování je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi-koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny. [6]

Vytvrzování se skládá z následujících etap (obr. 2.23): [6]

- **rozpuštěcí žihání** – získává se homogenní tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$
- **rychlého ochlazení** – výsledkem je přesycený tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$
- **precipitačního vytvrzování** – dochází ke tvorbě precipitátu a zpevnění struktury



Obr. 2.23 Teplotní průběh vytvrzování [6]

### **Rozpouštěcí žihání**

Rozpouštěcí žihání se provádí při teplotách nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky. V praxi se volí teploty žihání 10 – 15 °C pod eutektickou teplotou. Hodnotu žihací teploty je nutno dodržet v úzkých tolerancích  $\pm 3$  až max. 5 K. Doba rozpouštěcího žihání musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k dokonalému rozpuštění segregovaných fází vytvrzovacího prvku a závisí zejména na disperzitě výchozí struktury. [6]

### **Ochlazení z homogenizační teploty**

Cílem ochlazení je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze  $\alpha(\text{Al})$ . (Této operaci se často nesprávně říká kalení.) Ochlazení z homogenizační teploty do teploty maximálně 150-200 °C musí být velmi rychlé. Jako ochlazovací médium se proto používá studená voda. Doba mezi vyjmutím odlitku ze žihací pece a ponořením do vody musí být co nejkratší – zvláště u tenkostěnných odlitků nemá překročit max. 10 s. Zajištění této podmínky je někdy dosti obtížné. S výhodou se používají speciální žihací pece s otevíratelným dnem, z nichž odlitky padají přímo do chladicí lázně. Jestliže není ochlazení odlitku po vyjmutí ze žihací pece dostatečně rychlé, může dojít k částečné segregaci fází přísadového prvku na hranicích zrn a k podstatnému zhoršení konečných vlastností. Důležité je uložení odlitků v koši tak, aby se zajistilo jejich rovnoměrné ochlazování. [6]

Po rychlém ochlazení je struktura slitiny tvořena přesyceným tuhým roztokem  $\alpha(\text{Al})$ . Je tedy poměrně měkká a tvárná. Odlitkům proto obvykle nehrozí vznik napěťových prasklin. [6]

### **Precipitační vytvrzování**

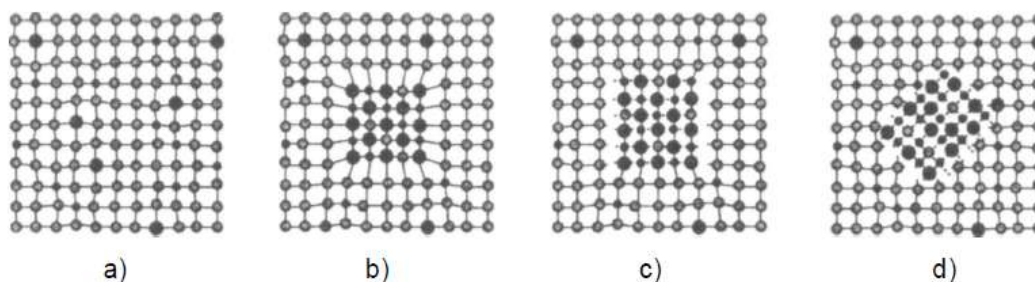
Pod pojmem precipitační vytvrzování (často se nazývá stárnutí) se rozumí proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$ . Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze. U slitin Al-Si-Mg je touto fází  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , u slitin Al-Cu to je  $\text{CuAl}_2$ . [6]

Růstem těchto zárodků vznikají koherentní precipitáty, které se označují jako Guinier-Prestonovy zóny. Koherentnost znamená, že tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku jehož mřížku poněkud deformují a



vyvolávají v ní vnitřní pnutí. Tato pnutí jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Při zvýšení teploty nad optimální hodnotu a s rostoucím časem se koherentní precipitáty dále zvětšují a jejich počet se snižuje. [6]

Zpočátku se jedná o tzv. semikoherentní částice, ještě částečně spojené s tuhým roztokem. Tento proces je ještě doprovázen zvýšením pevnosti a tvrdosti. Obvykle obsahují slitiny po vytvrzení koherentně až semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi. [6]



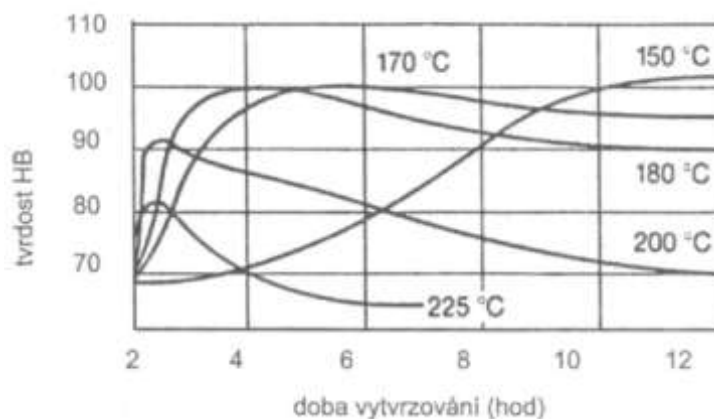
Obr. 2.24 Vyloučení precipitační fáze: [6]

- a) tuhý roztok      b) koherentní fáze  
c) částečně koherentní precipitát      d) nekoherentní precipitát

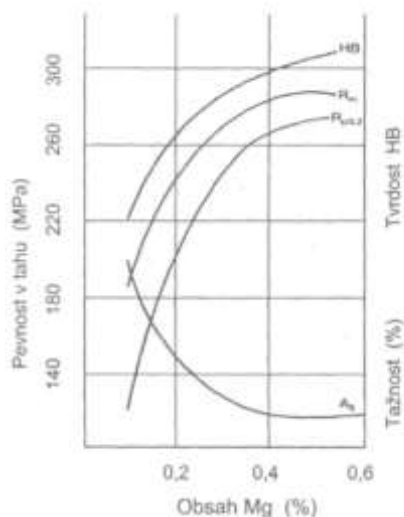
Podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku může k precipitačnímu vytvrzování hliníkových slitin docházet již za normální teploty nebo za teplot zvýšených. Podle toho se rozlišuje vytvrzování za studena a vytvrzování za tepla. [6]

### Vytvrzování za tepla

Slitiny Al-Si-Mg se vytvrzují za tepla. Teploty vytvrzování se volí podle druhu slitiny, obvykle v rozmezí 140-180 °C, doba vytvrzování 3 až 8 hodin. Při zvýšení teploty je nutno zkrátit dobu vytvrzování. Tyto vzájemné kompenzace jsou však možné jen do určité míry. Jak ukazuje obr. 2.25. pro slitinu AlSi10Mg, při vysokých teplotách vytvrzování se získávají horší mechanické vlastnosti, než při teplotách optimálních. Dobu a také čas vytvrzovacího žíhání je nutno dodržovat v úzkých mezích. [6]



Obr. 2.25 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [6]



Vlastnosti slitiny po vytvrzení jsou závislé na obsahu vytvrzujícího prvku. Obsah hořčíku u běžných vytvrzitelných slitin Al-Si-Mg bývá v mezích 0,3 – 0,45 % Mg, ve vysokopevných slitinách až kolem 0,7 %. S rostoucím obsahem Mg se zvyšuje pevnost a tvrdost, avšak klesá tažnost (Obr. 2.26). [6]

Obr. 2.26. Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení [6]

Vytvrzování je nutno chápat jako komplexní proces, skládající se z několika návazných kroků, z nichž každý má vliv na konečný efekt. Tak např. kromě chemického složení a podmínek vytvrzování závisí výsledné vlastnosti i na teplotě rozpouštěcího žíhání. Obvykle platí, že při vyšší teplotě rozpouštěcího žíhání se dosahuje lepších mechanických hodnot. Orientační časový režim vytvrzování je uveden na obr.2.27. [6]



Obr. 2.27 Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla [6]

## 2.4 Zkušební metody

### 2.4.1 Měření naplynění (Metoda dvojího vážení)

Metoda dvojího vážení určuje velikost naplynění taveniny. Je založená na rozdílu měrné hmotnosti (hustoty) vzorku ztuhlého za běžného atmosférického tlaku a hustoty vzorku ztuhlého ve vakuu o definovaném podtlaku 80 mbar (8kPa), za použití přístroje opatřeného přesnou vývěvou. [20]



Obr. 2.28: Zařízení na měření naplynění [21]

Výsledkem je stanovení hustoty vzorku ztuhlého za běžného atmosférického tlaku  $\rho_R$  a vzorku ztuhlého ve vakuu  $\rho_V$ . [20]

Vztahy pro výpočet indexu hustoty (Dichte index - DI):

$\rho_R$  ..... hustota vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku

$\rho_V$  ..... hustota vzorku ztuhlého ve vakuu 80 mbar (8kPa)

$\rho_{Vody}$  ..... hustota vody = 1 g/cm<sup>3</sup>

$m_{RAT}$  ..... hmotnost vzorku R, váženého v atmosféře [g]

$m_{RVO}$  ..... hmotnost vzorku R, váženého ve vodě [g]

$m_{VAT}$  ..... hmotnost vzorku V, váženého v atmosféře [g]

$m_{VVO}$  ..... hmotnost vzorku V, váženého ve vodě [g]

$$\rho_R = \frac{m_{RAT}}{m_{RAT} - m_{RVO}} * \rho_{Vody}$$

$$\rho_V = \frac{m_{VAT}}{m_{VAT} - m_{VVO}} * \rho_{Vody}$$

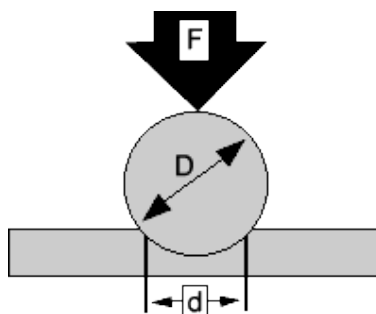
$$DI = \frac{\rho_R - \rho_V}{\rho_R} * 100 \quad [\%]$$

### 2.4.2 Měření tvrdosti

Zkouška tvrdosti je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu. Tvrdost se určuje vtláčováním indentoru (vnikacího tělesa) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. V principu existují dva způsoby měření tvrdosti. [22]

První způsob, používaný u kovů a keramiky, kdy je indentor zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické (trvalé) deformaci materiálu. Tyto metody označujeme jako metody vnikací (indentační). Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska a v současné době se používá většinou pro hodnocení pryží a plastů.[22]

Nejstarší indentor je kulička  $\varnothing$  10 mm vyrobená z vysokopevné oceli příp. karbidu wolframu, tato zkouška se jmenuje Brinellova zkouška tvrdosti.[22]



Obr. 2.29: Princip měření tvrdosti dle Brinella [23]

Ve strojírenské praxi se rozšířila metoda měření tvrdosti podle Brinella, která je méně náročná na přípravu povrchu zkušebního tělesa a deformace v okolí vtisku zaujímá větší objem ve srovnání s měřením tvrdosti podle Vickerse. Brinellovo tvrdostní číslo (HB) se počítá ze vztahu: [22]

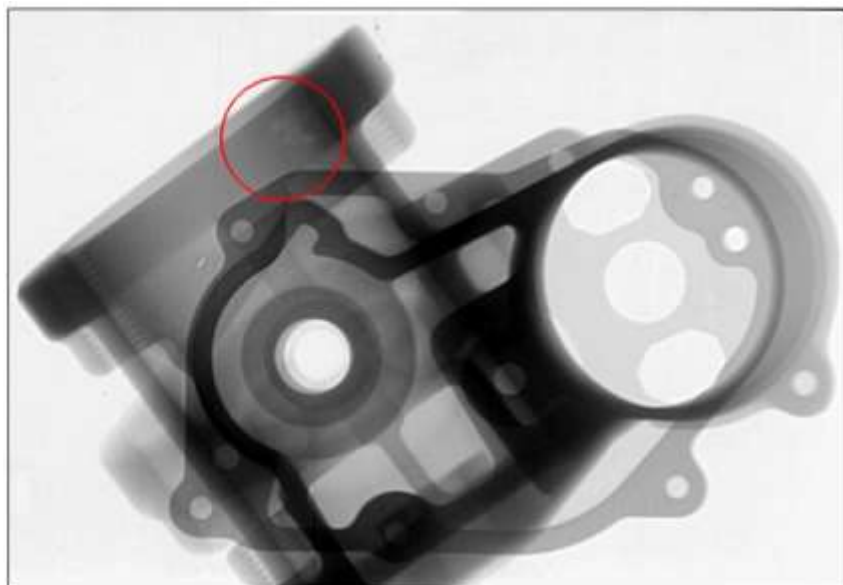
$$HB = \frac{2.F}{[\pi.D.(D-\sqrt{D^2-d^2})]} , [kp. mm^{-2}]$$

kde D, d jsou průměry kuličky a vtisku (mm).

Vztah pro výpočet tvrdosti dle Brinella platí pouze za podmínky, že průměr vtisku d leží v rozmezí (0,3-0,6) D. Dodržení této podmínky je v normách zaručeno tak, že pro různé materiály je předepsána tzv. zatěžovací konstanta k (k je dáno poměrem zatěžovací síly ke čtverci průměru kuličky). Hodnota k je odstupňována podle tvrdosti zkoušených materiálů do šesti stupňů.[22]

### 2.4.3 Radiografie (RTG)

Digitální radiografie DR a počítačová radiografie CR jsou odnože klasické radiografické metody NDT, které používají nefilmové detektory záření. Nahrazují některé prvky systému klasické radiografie moderní technikou, a tak umožňuje výhodnější zpracování radiografického obrazu pomocí výpočetní techniky. Umožňují (stejně, jako klasická - filmová radiografie) získat obraz vnitřních vad. Možnosti aplikací metod DR a CR mnohdy přesahují možnosti klasické radiografie. Díky velké expoziční šířce se metody velmi dobře hodí pro kontrolu tvarově velmi složitých odlitků, významný potenciál je také v oblasti měření koroze. Vzhledem k prokázaným časovým úsporám a nižším provozním nákladům mají tyto modifikace radiografie velkou perspektivu. [24]



Obr. 2.30: Snímek odlitku [24]

#### Princip metody

Digitální radiografie a počítačová radiografie nahrazují filmový materiál jinými snímači, které umožňují převést profil neviditelného záření na viditelný obraz v digitální formě. Vznik profilu neviditelného záření je shodný pro digitální radiografii, klasickou radiografii i radioskopii. [24]

### 2.4.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem je základní a nejrozšířenější mechanická zkouška. Principem zkoušky je přetržení zkušební tyče a následné stanovení tzv. napěťových a deformačních charakteristik. Nejčastěji zjišťovanými vlastnostmi na 1 zkušební tyči jsou 4 základní normované mechanické vlastnosti:[25]

1. Mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa]
2. Mez kluzu v tahu  $R_e$  [MPa] nebo  $R_{p0,2}$  [MPa]
3. Tažnost  $A$  [%]
4. Kontrakce  $Z$  [%]

Napěťové charakteristiky:  $R_m, R_{p0,2}$

Deformační charakteristiky:  $A, Z$

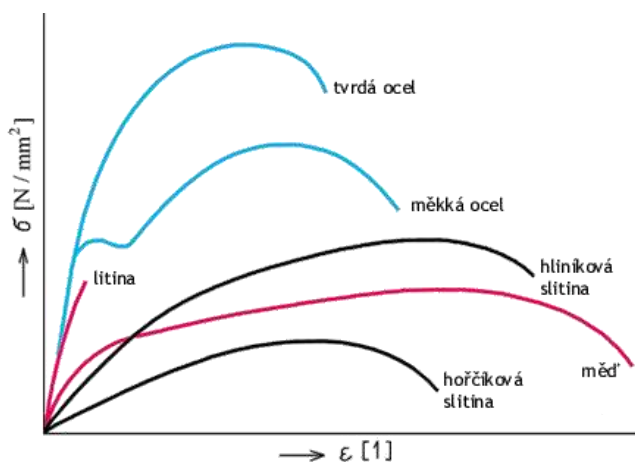
Výpočet mechanických vlastností:[25]

$$1. \text{ Mez pevnosti v tahu: } R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

$$2. \text{ Mez kluzu v tahu: } R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

$$3. \text{ Tažnost: } A = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 \quad [\%]$$

$$4. \text{ Kontrakce: } Z = \frac{\Delta S}{S_0} * 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 \quad [\%]$$



Obr. 2.31: Tahové diagramy pro různé materiály [26]

### 2.4.5 Metalografie

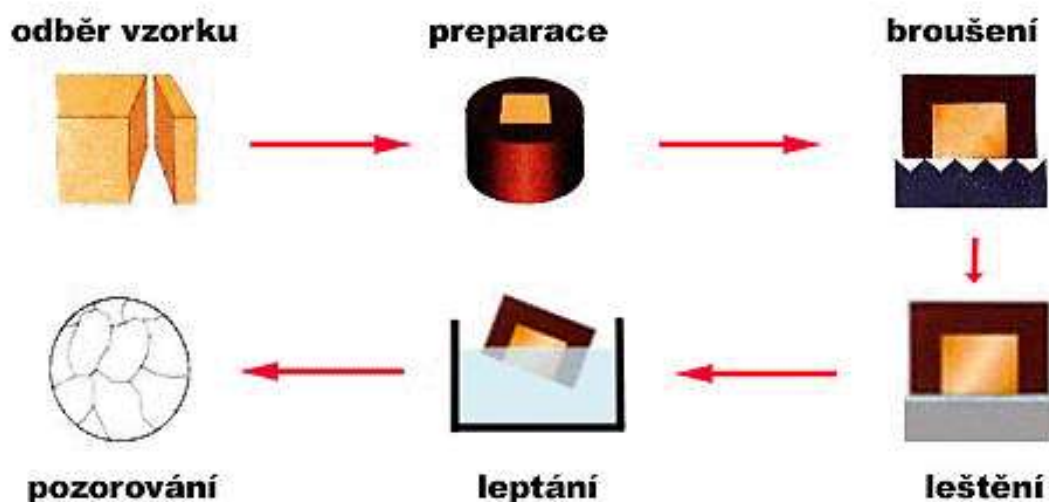
Metalografie je nauka, která pojednává o vnitřní stavbě kovů a slitin. Jejím cílem je zviditelnění struktury materiálu a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu.[27]

Metalografie umožňuje:[27]

- zjišťovat souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi
- sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě a zpracování (průběžná či mezioperační kontrola)
- hledat příčiny vad materiálu nevyhovujících výrobků nebo vysvětlit důvody selhání nějakého zařízení

Kovy a jejich slitiny jsou materiály neprůhledné a k jejich pozorování tedy používáme optické mikroskopy v režimu odrazu. A protože nejvyšší odrazivost mají plochy dokonale rovné a hladké, naším cílem bude připravit vzorek právě s takovou plochou.[27]

Postup přípravy vzorku pro pozorování (tzv. metalografického výbrusu) se skládá z několika na sebe navazujících kroků. Jednoduché schéma postupu je na obr.2.32. Každý z uvedených kroků velmi výrazně ovlivňuje kvalitu výsledného metalografického výbrusu a proto se preciznost provedení každého kroku projeví na budoucích možnostech pozorování vzorku. [27]



Obr. 2.32: Schéma přípravy metalografického výbrusu [27]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Popis experimentu

Cílem experimentu je ověřit, zda-li zařazení technologie HIP do výrobního procesu pomůže zvýšit mechanické vlastnosti. Dalšími dílčími cíli je optimalizace závěrečných technologických fází výroby vybraného typu odlitku. Jedná se o přípravu taveniny, porovnání různých druhů ovlivňování krystalizace tuhnoucí slitiny ve skořepinové formě pomocí technologií vyvinutých společností Alucast, s.r.o. (JFcasting, JFKcasting), dále optimalizaci tepelného zpracování. Výroba odlitků a zkušebních těles bude rozdělena na tři výrobní směry. Do jednotlivých výrobních směrů bude začleněna technologie HIP, aby byla možnost ověřit, zda-li je prospěšná a v jaké míře. K vyhodnocení budou použity hodnoty mechanických vlastností, jak samostatně litých zkušebních tyčinek, tak i zkušebních tyčinek vypreparovaných z odlitků. Snahou bude nejenom získání mechanických hodnot dle požadavků zákazníka, ale docílit co nejlepších hodnot. K ověření dosažených hodnot, by nám měly posloužit hodnoty DAS naměřené z metalografických výbrusů.

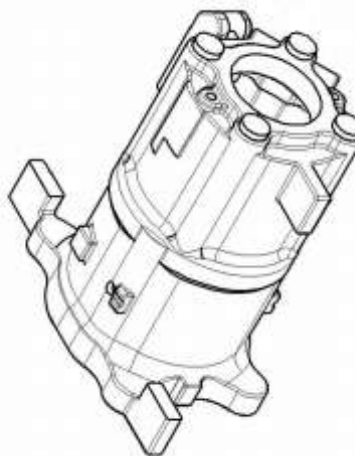
K experimentu byl vybrán odlitek určený pro letecký průmysl. Jedná se o těleso hydrauliky, z materiálu EN AC-AISi7Mg0,6. Minimální hodnoty mechanických vlastností, které jsou požadovány zákazníkem dosahují těchto hodnot:

**Mez pevnosti  $R_m = \text{min. } 280 \text{ MPa}$**

**Mez kluzu  $R_{p0,2} = \text{min. } 240 \text{ MPa}$**

**Tažnost  $A_5 = \text{min. } 3,5 \%$**

**Tvrдост = min. 80 HB**



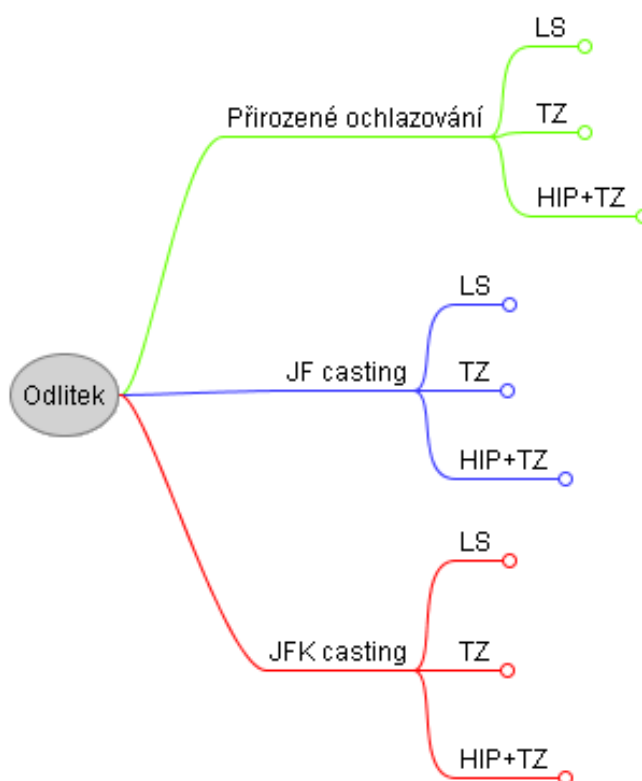
Obr. 3.1: Odlitek pro experiment



### Výrobní směry

Výroba odlitku bude rozdělena do tří hlavních směrů, které budou zastupovat klasické konvenční lití (samovolné ochlazování na vzduchu – Přirozené ochlazování - PO). Další dva směry budou zastoupeny výrobními technologiemi vyvinutými společností Alucast, s.r.o. Jedná se o dva způsoby řízeného ochlazování, prvním je JFcasting (JF) a druhým JFKcasting (JFK). Cílem této diplomové práce není detailní popis těchto technologií, ale pouze jejich využití pro zastoupení všech výrobních způsobů společnosti k ověření následného začlenění technologie HIP do výrobního cyklu.

Tyto tři výrobní směry: Přirozené ochlazování, JFcasting a JFKcasting se dále dělí na způsoby zpracování odlitků a zkušebních tyčinek. Jedná se o LS – litý stav, TZ – tepelné zpracování, HIP + TZ – technologie HIP + tepelné zpracování. Na obr. 3.2 můžeme vidět schéma výrobních směrů experimentu.



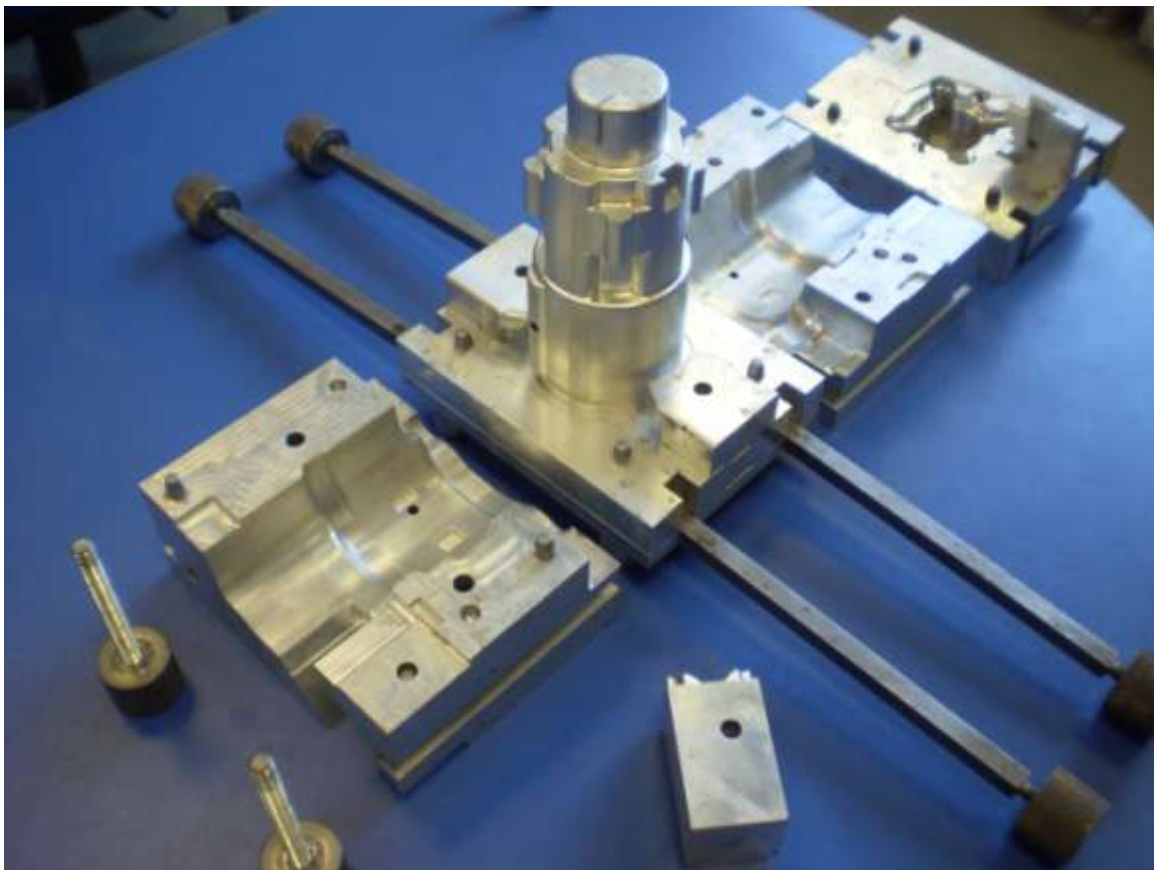
Obr. 3.2: Schéma výrobních směrů experimentu

Pro každý výrobní směr a typ zpracování budou vyrobeny určitý počet odlitků a zkušebních tyčinek. Směr PO je pro nás jako referenční, hlavní výrobní směry jsou JFcasting a JFKcasting.

## 3.2 Výroba odlitků a zkušebních těles

### 3.2.1 Výroba voskového modelu

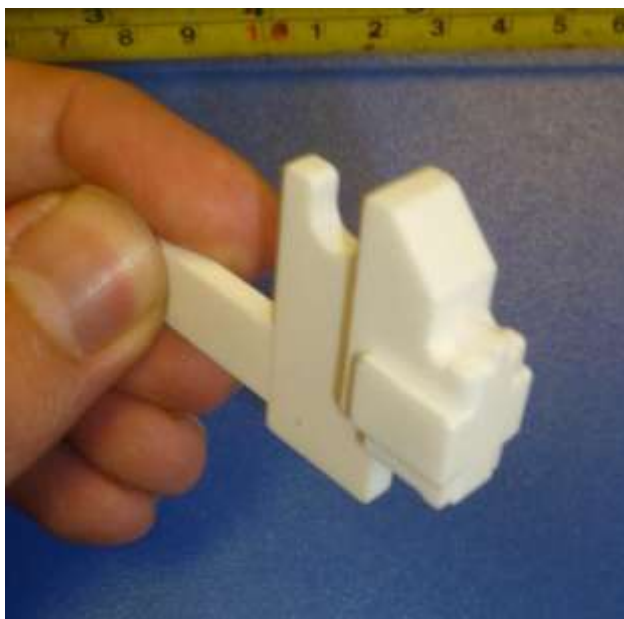
Pro výrobu odlitku bylo potřeba vyrobit voskové modely odlitku a zkušebních tyčinek. Pro výrobu voskového modelu byla použita hliníková matečná forma, která se skládá z 18 částí (obr.3.3).



Obr. 3.3: Matečná forma pro voskový model

Matečná forma je před složením řádně vyčištěna a promazána. Po složení matečné formy je naplněna voskem o teplotě  $55^{\circ}\text{C}$  a tlakem  $0,15-0,2\text{ MPa}$  pomocí plnicího zařízení. Poté je naplněná matečná forma nechána chladnout cca 20 minut. Další operací je rozebrání matečné formy a opatrné vyjmutí voskového modelu. Následuje kontrola voskového modelu a případné začištění nerovností a nežádoucích vad na voskovém modelu.

Protože voskový model má dutinu, která nelze pomocí matečné formy vytvořit, tak muselo být použito bílé vyplavitelné jádro (obr. 3.4). Toto jádro je z voskového modelu odstraněno pomocí ponoření do lázně s roztokem kyseliny citronové.



Obr. 3.4: Bílé vyplavitelné jádro



Obr. 3.5: Voskový model s vyplavitelným jádrem



Obr. 3.6: Detail dutiny od vyplavitelného jádra

Po odstranění jádra a začištění všech vad, jsou k voskovým modelům připojeny vtokové kůly a sestaveny do stromečku s licí jamkou. Nechají se den vyzrát kvůli rozměrové stabilizaci a jsou připraveny k další výrobní operaci.

### 3.2.2 Výroba skořepinové formy a vytavování

Další výrobní operací, od které je i technologie vytavitelného vosku odvozována, jak bylo již dříve zmíněno („to invest - nanášet“), je tvorba skořepinové formy. Jedná se o velmi důležitou operaci, která klade vysoké nároky na zručnost a zkušenost pracovníků slévárny Alucast, s.r.o.

Stromeček s voskovými modely je postupně namáčen v keramické suspenzi (obr. 3.7) a poté obalován keramickým posypovým materiálem o různé zrnitosti. Pro tvorbu jednotlivých obalů jsou používány různé materiály. Jak pro keramickou suspenzi, tak i pro posypový materiál (Customcote, Primecote, ZrO<sub>2</sub> Sand, Molochit, Fused Silica). Skořepinová forma pro experimentální odlitek bude vytvořena z pěti obalů.



Obr. 3.7: Nanášení keramické suspenze

První obal je velmi důležitý, protože kopíruje plně tvar voskového modelu a je třeba, aby se dostal na všechny potřebná místa. Proto musí mít keramická suspenze dobrou tekutost. Ta se sleduje pomocí hustoty, která se měří Fordovým pohárkem. Hustota se udává jako čas, za který vyteče celý obsah Fordova pohárku s keramickou suspenzí. Čím kratší čas, tím řidší (tekutější) je suspenze. Posypový materiál na první a druhý obal jsou velmi jemné, protože dávají následně odlitku kvalitu povrchu. Na obr. 3.8 můžeme vidět sušení prvního obalu stromečku.



Obr. 3.8: První obal na stromečku

Po nanesení keramické suspenze na stromeček s voskovými modely následuje obalování keramickým posypem ve sprchovém obalovacím zařízení.

Další obaly skořepinové formy (třetí a další), již slouží pro zpevnění a stabilitu. Na obr. 3.9 můžeme vidět sušení posledního pátého obalu.

Mezi nanášením jednotlivých obalů skořepinové formy probíhá sušení obalů v klimatizované a větrané místnosti po určité stanovenou dobu, dle jednotlivých typů obalů. Všechny požadované parametry byly dodržovány, dle předpisů společnosti Alucast, s.r.o.



Obr. 3.9: Sušení skořepinové formy

Další výrobní operací je vytavení voskového modelu ze skořepinové formy. Provádí se v autoklávu, do něhož se zavezou skořepinové formy a pomocí tlaku (0,55MPa) a teploty (160°C) se vyvine pára, která voskový model nataví a dostane ze skořepinové formy. Případně se poté může ještě skořepinová forma vypláchnout, aby se z ní odstranily všechny nečistoty. Nyní je již skořepinová forma připravena na následné výrobní operace (obr. 3.10).



Obr. 3.10: Připravená skořepinová forma



### 3.2.3 Příprava taveniny a žíhání skořepinové formy

Pro odlitek byl dle požadavků použit materiál EN AC- $\text{AlSi7Mg0,6}$ . Jedná se o slitinu s nejvyššími mechanickými vlastnostmi typu Al-Si. Obsahuje minimální množství příměsí a nečistot. Vyznačuje se velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, vzniku trhlin a svařitelností. [6]

#### Chemické složení

Označení slitiny		Chemické složení v %									
Číselné značení	Chemické značení	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Jiné*		Al
									Každý	Celkem	
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	6,5-7,5	0,1-9	0,0-5	0,1-0	0,45-0,70	0,0-7	0,08-0,25	0,03	0,10	zbytek

\* nezahrnuje modifikující nebo rafinační prvky jako jsou Na, Sr, ...

Tab. 3.1 Chemické složení  $\text{AlSi7Mg0,6}$  [28]

#### Mechanické vlastnosti

Označení slitiny		Stav TZ	Pevnost v tahu $R_m$ [MPa] min.	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min.	Tažnost $A_{50}$ [%] min.	Tvrдость podle Brinella [HB] min.	Způsoby lití
Číselné značení	Chemické značení						
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	T6	250	210	1	85	Litých do pískových forem
		T6	320	240	3	100	Litých do kovových forem
		T64	290	210	6	90	
		T6	290	240	2	85	Litých na vytavitelný model

T6 – stav tepelného zpracování (TZ) – vytvrzování na maximální pevnost a tažnost

T64 – stav tepelného zpracování (TZ) – vytvrzeno na maximální houževnatost

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti  $\text{AlSi7Mg0,6}$  [28]

**Fyzikální vlastnosti**

Číselné značení	Chemické značení	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	Teplota tání [°C]	Interval tuhnutí [°C]	Lineární smrštění při tuhnutí [%]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)]
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	2690	71-75	660	625-550	1,3	0,07

Tab. 3.3 Fyzikální vlastnosti AlSi7Mg0,6 [28]

**Slévárenské vlastnosti**

Označení		Slévárenské vlastnosti		
číselné	chemické	zabíhavost	Odolnost proti korozi	nepropustnost
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	B	A	B

Tab. 3.4 Slévárenské vlastnosti AlSi7Mg0,6 [28]

**Technologické vlastnosti**

Označení		Technologické vlastnosti			
číselné	chemické	obrobitelnost	svařitelnost	Odolnost proti korozi	Anodická oxidace
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	B	B	B	D

Tab. 3.5 Technologické vlastnosti AlSi7Mg0,6 [28]

Na experiment byl použit čistý materiál v podobě housek. Chemické složení housek je uvedeno v příloze 1. Celkem bylo nataveno 150kg čisté hliníkové slitiny EN AC-AISi7Mg0,3, rozdíl v množství hořčíku byl dorovnán dolegováním. Na tavení housek byla použita indukční pec s kelímkem o kapacitě 150 kg taveniny (obr. 3.11).



Obr. 3.11: Tavení housek v indukční peci

Během tavení housek byly již v žíhací peci uloženy skořepinové formy odlitků i zkušební tyčinek. Teplota žíhání skořepinových forem byla nastavena na 750°C. Do předních skořepin byly umístěny termočlánky pro měření aktuální teploty skořepiny a možnost zjistit pokles teploty při otevření žíhací pece a následném přesunu na licí pole. Rozložení skořepinových forem v žíhací peci je na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Rozložení skořepinových forem v žíhací peci



Následovalo ošetření taveniny pomocí soli PROBAT FLUSS 224, která se vmíchala do povrchové vrstvy taveniny a poté se stáhla z hladiny taveniny struska.

Následovalo dolegování hořčíku pomocí tyčinek. Množství hořčíkových tyčinek bylo 5 ks cca po 60 g (celkově 300g). Ponořily se pomocí děrovaného zvonu na dno kelímku a nechaly se rozpustit. Abychom si ověřili, že dodané množství hořčíku dostačuje, tak jsme provedli na zkušebním tělese spektrální analýzu taveniny. Ve společnosti Alucast, s.r.o. se analýza provádí na moderním spektrometru Bruker Q4 Tasman (obr. 3.13).



Obr. 3.13: Spektrometr Bruker Q4 Tasman

Výsledek spektrální analýzy pro kontrolu dostatečného množství hořčíku plně vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 1706. Konkrétní výsledky jsou uvedeny v příloze 2.

Od natavení taveniny byla kontrolována teplota taveniny, která se pohybovala kolem 715°C. Jako další operace pro zlepšení kvality taveniny bylo provedeno odplynění taveniny pomocí jednotky FDU (obr. 3.14), kdy po dobu 4 minut byl přes rotační impeler do taveniny vháněn dusík (viz. kapitola 2.3.1). Poté byla taveniny ponechána 10 minut v klidu a byly odebrány vzorky na měření naplynění. Jeden vzorek byl ponechán, aby ztuhl na vzduchu, druhý byl vakuován na 80 mbar.



Obr. 3.14: jednotka FDU

Následně bylo provedeno měření naplynění a zjištění indexu hustoty, nebo-li Dichte indexu. Více k metodice měření je již uvedeno v kapitole 2.4.1.

#### Výpočet Dichte indexu:

$m_{RAT}$  ..... hmotnost vzorku R, váženého v atmosféře [g]

$m_{RVO}$  ..... hmotnost vzorku R, váženého ve vodě [g]

$m_{VAT}$  ..... hmotnost vzorku V, váženého v atmosféře [g]

$m_{VVO}$  ..... hmotnost vzorku V, váženého ve vodě [g]

$$m_{RAT} = 87,99 \text{ g}$$

$$m_{RVO} = 54,73 \text{ g}$$

$$m_{VAT} = 104,56 \text{ g}$$

$$m_{VVO} = 64,94 \text{ g}$$

$$\rho_R = \frac{m_{RAT}}{m_{RAT} - m_{RVO}} * \rho_{Vody}$$

$$\rho_R = \frac{87,99}{87,99 - 54,73} * 1 = 2,645 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_V = \frac{m_{VAT}}{m_{VAT} - m_{VVO}} * \rho_{Vody}$$

$$\rho_V = \frac{104,56}{104,56 - 64,94} * 1 = 2,639 \text{ g/cm}^3$$

$$DI = \frac{\rho_R - \rho_V}{\rho_R} * 100 \text{ [%]}$$

$$DI = \frac{2,645 - 2,639}{2,645} * 100 = 0,2268 \text{ %}$$

Výsledná hodnota Dichte indexu 0,2268 %, značí dobře odplyněnou taveninu.

Poslední úpravou taveniny před odléváním pro zlepšení vlastností odlitků bylo očkování. Více k očkování je uvedeno v kapitole 2.3.2. Pro očkování byly použity tyče AlTi5B1 v množství 3 ks po cca 100 g/ks. Následně byla provedena poslední kontrola chemického složení taveniny na spektrometru Bruker Q4 Tasman. Výsledky chemického složení po očkování splňují požadavky a jsou uvedeny v příloze 3.

Takto upravená tavenina splňující všechny požadavky je připravena k dalšímu zpracování.

### 3.2.4 Odlévání

#### Značení odlitků a zkušebních tyčinek

Před odléváním odlitků a zkušebních tyčinek dle výše zmiňovaných výrobních směrů, je potřeba určit systém značení jednotlivých odlitků a zkušebních tyčinek, aby pro následné zpracování nemohlo dojít k záměně a možnosti ovlivnění konečných výsledků. Proto si představíme systém značení.

#### Značení odlitků

<b>3.</b>	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>A.</b>	<b>0</b>
značení ochlazování:	typ zpracování	pořadové číslo stromečku	značení odlitků ze stromku	označení termické analýzy stromečku
1 - přirozené ochlazování	1 - LS - litý stav	1	A	
2 - JF casting	2 - TZ - tepelné zpracování	2	B	
3 - JFK casting	3- HIP + TZ - hipování a tepelné zpracování			

#### Značení samostatně litých tyčinek

<b>1.</b>	<b>3.</b>	<b>1.</b>	<b>C</b>
značení ochlazování:	typ zpracování	pořadové číslo stromečku	značení tyčinek
1 - přirozené ochlazování	1 - LS - litý stav	1	
2 - JF casting	2 - TZ - tepelné zpracování	2	
3 - JFK casting	3- HIP + TZ - hipování a tepelné zpracování		

Obr. 3.15: Značení odlitků a zkušebních tyčinek

### **Měření teploty skořepinové formy**

Pro zjištění správné teploty skořepinové formy v žíhací peci, transportu na licí pole a reálnou teplotu skořepin v žíhací peci při otevřených vratech slouží zapuštěné termočlánky do několika skořepinových forem.

Při pokusu o kolik klesne teplota skořepinové formy s počáteční teplotou 750°C v peci při otevřených dveřích za 2 minuty jsme získali následující údaje:

1.řada skořepinových forem – teplota 650 °C

2.řada skořepinových forem – teplota 690 °C

Proto bylo velmi důležité aby vrata žíhací pece byla okamžitě po vyndání skořepinové formy opět uzavřena. A nedocházelo k poklesu teploty skořepiny, což by mohlo způsobit špatnou zabíhavost kovu nebo možnost prasknutí skořepinové formy vlivem velkého teplotního rozdílu.

### **Odlévání**

Skořepinové formy byly odlévány vrchem přes vtokový kůl, bez použití jakéhokoliv filtru. Během odlévání se prováděla kontrola teploty taveniny, která se pohybovala kolem teploty 715°C ±7°C. Doba lití byla přibližně 5 sekund. Po odlití odlitku byly odlity zkušební tyčinky. Značení probíhalo prozatím umístěním drátěného oka s vyraženým číslem. Pořadí odlévání jednotlivých výrobních směrů bylo následující:

1) JFcasting – odlitky a zkušební tyčinky

2) JFKcasting – odlitky a zkušební tyčinky

3) Přirození ochlazování – odlitky a zkušební tyčinky

K daným zkušebním tyčinkám pro výrobní směr JFcasting byla také odlévána sada 7 zkušebních tyčinek pro zkoušku optimálního tepelného zpracování.

Na následujících obr. 3.16 a obr. 3.17 můžeme vidět odlévání odlitků a zkušebních tyčinek.



Obr. 3.16: Odlévání odlitků



Obr. 3.17: Odlévání zkušebních tyčinek

### 3.2.5 Odstraňování skořepinové formy a vtokové soustavy

Další výrobní operací bylo odstranění skořepinové formy. Nejprve se provedlo hrubé odstranění skořepinových forem z odlitků a zkušebních tyčinek za pomoci ručního otlučení. Zbytky skořepinové formy byly následně odstraněny pomocí vodního tryskání, které odstranilo zbylou skořepinu a dalo odlitku lesklý hladký povrch (obr. 3.18).



Obr. 3.18: Odlitky po vodním tryskání

Po otryskání skořepiny byla odstraněna vtoková soustava a jednotlivé odlitky byly označeny jedinečným číslem dle systému značení na zbytky po vtokcích. Odstranění vtokových soustav bylo provedeno na pásové pile. Stejně jako bylo provedeno odstranění zbytků skořepiny z odlitků pomocí vodního tryskání, tak stejný postup byl proveden se zkušebními tyčinkami. Ty po odřezání vtokových soustav na pásové pile byly svázaný do svazku a označeny.



Obr. 3.19: Hotový odlitek

### 3.2.6 Zkouška optimálního tepelného zpracování

Pro zajištění dosažení správných mechanických hodnot, bylo na 7 sadách zkušebních tyčinek provedeno tepelné zpracování – rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí. Všechny sady byly svázané do svazků dle obr. 3.20.



Obr. 3.20: Svazky zkušebních tyčinek – starý způsob (vlevo), nový způsob (vpravo)

Změna vázání tyčinek byla provedena z důvodu rovnoměrného působení teploty na každou zkušební tyčinku a také z důvodu zabránění prohýbání tyčinek a následnému zkreslování výsledků při vyhodnocování mechanických vlastností při zkoušce jednoosým tahem. Starý způsob zkušební tyčinky byl nevhodný z toho důvodu, že tyčinky byly svázané v prostřední partii, kde tvořily vrstvu materiálu oproti krajům. A také se často ohýbaly. Proto došlo ke změně v manipulaci se svazky zkušebních tyčinek.

Všech 7 sad zkušebních tyčinek bylo dáno na rozpouštěcí žíhání společně a to na teplotu  $543^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$  a dobu výdrže 8 hodin s následným zamočením do vody s časem zamočení do 10 sekund.

Následně byly všechny sady zkušebních tyčinek umístěny do pece na umělé stárnutí. S parametry  $160^{\circ}\text{C}$  a doba výdrže jednotlivých sad se již měnila:

4hod US – sada 222C

5hod US – sada 223C

6hod US – sada 224C

7hod US – sada 225C

8hod US – sada 226C

9hod US – sada 227C

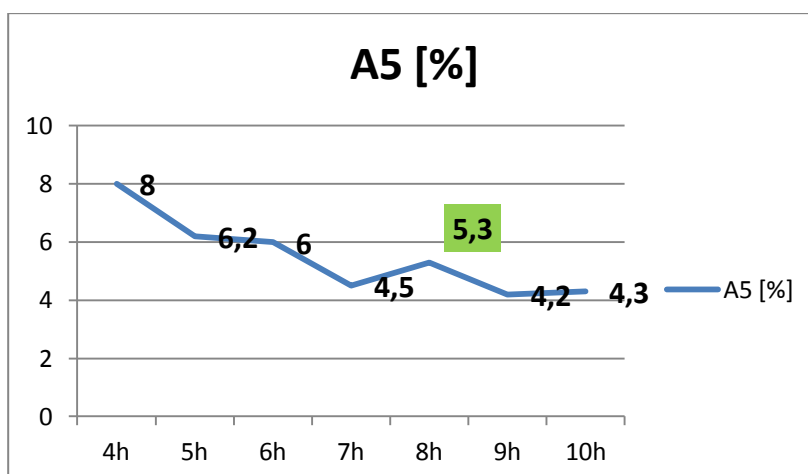
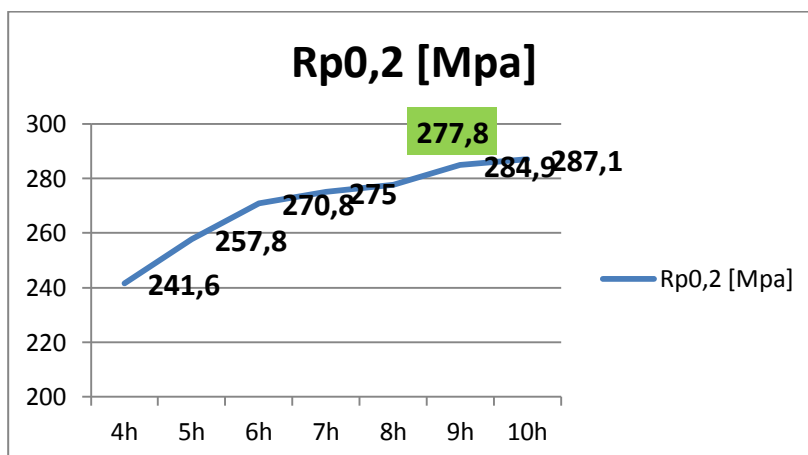
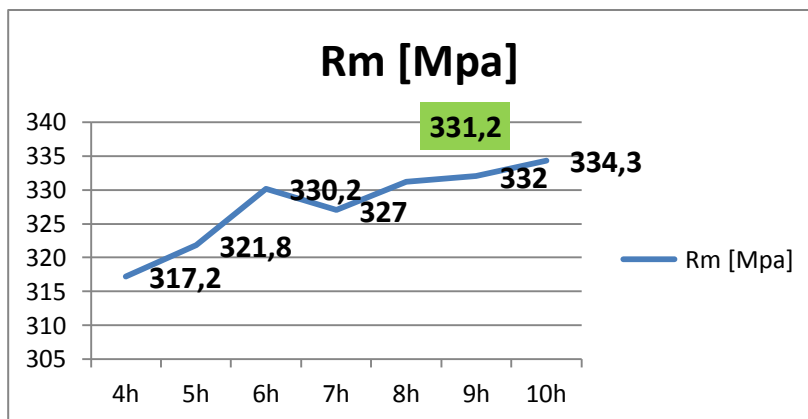
10hod US – sada 228C

Sady byly postupně vytahovány z pece dle požadované doby výdrže. Následně byly sady zkušebních tyčinek roztrhnuty a vyhodnoceny.



### 3.2.7 Vyhodnocení optimálního tepelného zpracování

Sady zkušebních tyčinek, které byly zpracovány dle výše uvedeného postupy byly roztrhnuty na zkušebním zařízení pro jednoosý tah značky Zwick ve společnosti Alucast, s.r.o. Výsledky jednotlivých zkušebních tyčinek jsou uvedeny v příloze 4. Následně byl z každé sady vypočítán průměr hodnot  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a  $A_5$ . Tyto průměrné hodnoty byly vyneseny do grafů.



Vzhledem k výsledkům zkušebních tyčinek a požadovaným hodnotám od zákazníka se jako optimální jeví hodnoty získané pomocí 8hod US.



### 3.2.8 HIP technologie

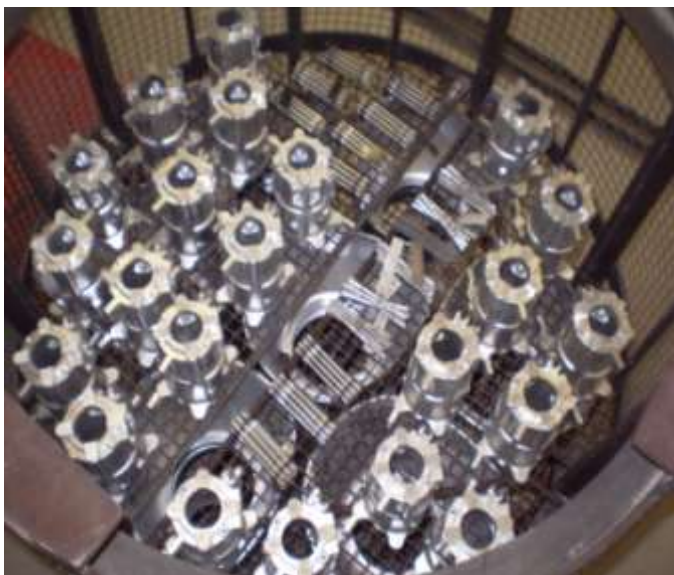
Na technologii HIP byly odeslány všechny odlitky a zkušební tyčinky dle označení. Jedná se o druhou číslici 3 (př. x.3.x.x), která značí zpracování odlitků HIP + TZ pro jednotlivé výrobní směry. Protože technologie HIP je prováděna v kooperaci nebylo možné získat bližší data. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.4 měla by tato technologie zlepšit mechanické vlastnosti odlitků.

### 3.2.9 Tepelné zpracování odlitku

Poslední výrobní operací pro všechny dané odlitky a zkušební tyčinky je tepelné zpracování dle parametrů vyzkoušených na sadě 7 zkušebních tyčí.

Jedná se o odlitky s označení na druhé místě buď s číslicí 2 nebo 3 (př. x.2.x.x nebo x.3.x.x).

Všechny odlitky a zkušební tyčinky byly dány na rozpouštěcí žíhání. Byly umístěny do horní části koše (obr. 3.21). Parametry výdrž 8 hod. a teplota  $543^{\circ}\text{C} \pm 6$ , zamočení koše do 10 sekund.



Obr. 3.21: Umístění odlitků a zkušebních tyčinek v koši na RŽ

Následně byly odlitky a zkušební tyčinky umístěny do pece na umělé stárnutí. Dle zkoušky optimálního tepelného zpracování byla nastavena teplota na  $160^{\circ}\text{C}$  a dobu výdrže 8 hodin. Po uplynutí doby výdrže byly pomalu otevírány vrata pece tak, aby mohlo docházet k postupnému pozvolnému ochlazení prostoru pece.



Obr. 3.22: Uložení v peci US

### 3.3 Měření sledovaných veličin

#### 3.3.1 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno pro kontrolu správnosti tepelného zpracování a pro zjištění dosažených hodnot tvrdosti, které byly požadovány. Měření se provádělo na tvrdoměru WFM dle zkušební metody Brinella s kuličkou o průměru 2,5 mm a zatížení 62,5 kpf.

Dle naměřených hodnot a porovnáním s minimální požadovanou hodnotou 80 HB, můžeme prohlásit, že všechny odlitky zpracované TZ a HIP+TZ vyhovují požadavku.



Obr. 3.23: Měření tvrdosti odlitku

Číslo odlitku	1.měření	2. měření	Průměr měření	HB
1.1.1.A	1,07	1,08	1,075	<b>64,9</b>
1.2.1.0.A	0,85	0,85	0,85	<b>107</b>
1.2.2.A	0,89	0,88	0,885	<b>98,3</b>
1.3.1.B	0,84	0,86	0,85	<b>107</b>
1.3.2.B	0,93	0,89	0,91	<b>92,8</b>
2.1.1.A	1,06	1,07	1,065	<b>67,5</b>
2.2.1.0.A	0,85	0,86	0,855	<b>106</b>
2.2.2.A	0,85	0,82	0,835	<b>111</b>
2.2.2.B	0,85	0,83	0,84	<b>110</b>
2.3.1.A	0,86	0,85	0,855	<b>106</b>
2.3.2.B	0,84	0,85	0,844	<b>108</b>
2.3.1.B	0,87	0,85	0,86	<b>104</b>
3.1.1.A	1,02	1,01	1,015	<b>74,7</b>
3.2.1.0.B	0,86	0,85	0,855	<b>106</b>
3.2.1.0.A	0,87	0,88	0,875	<b>101</b>
3.3.1.A	0,82	0,82	0,82	<b>115</b>
3.3.1.B	0,85	0,84	0,845	<b>108</b>

Tab. 3.6: Hodnoty tvrdosti odlitků

### 3.3.2 Metalografie (měření DAS)

Pro ověření výsledků mechanických vlastností bylo provedeno měření parametru DAS. Hodnoty DAS má přímou spojitost s hodnotami mechanických vlastností. Jestliže jsou vzdálenosti sekundárních os dendritů (DAS) velmi malé, tak bude také jemná struktura a vysoké hodnoty mechanických vlastností odlitku. Jak bylo již uvedeno v kapitole 2.2.3 na velikost parametru DAS má největší vliv rychlost ochlazování dle rovnice:

$$DAS = a * t_f^n$$

Kde: a – konstanta, závislá na slitině

n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí <0,3; 0,5>

$t_f$  – místní doba tuhnutí [6]

Pro vyhodnocení struktury odlitku a měření parametru DAS byly odebrány vzorky z určené partie odlitku (obr. 3.24). Celkem bylo odebráno po jednom vzorku z každého výrobního směru a typu zpracování. Celkově tedy bylo odebráno na vyhodnocení 9 ks vzorků z dolní partie odlitku.

Postup pro přípravu metalografického výbrusu na hodnocení struktury je uveden v kapitole 2.4.5.



Obr. 3.24: Odběr vzorku z odlitku

Příprava, hodnocení a měření probíhalo v laboratořích odboru Slévárenství a na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně.

Prvním krokem přípravy metalografického výbrusu bylo zalisování vzorků na zařízení Struers LaboPress 3 pomocí Dentacrylu (metylkrylátové pryskyřice). Parametry této operace jsou: uzavírací síla 20 kN, při teplotě 180°C po dobu 7 minut a následné ochlazování zalisovaného vzorku po dobu 3 minut.

Následovalo broušení vzorků na přístroji Struers LaboPol-5 (obr. 3.25). Broušení probíhalo na brusných kotoučích se zrnitostí od větší k menší. Brusné cyklus s skládal z broušení, opláchnutí vzorku, vizuelním vyhodnocení povrchu a případné opakování cyklu dokud nebyl povrch dostatečné kvality.



Obr. 3.25: Přístroj Struers LaboPol-5

Další operací bylo leštění vzorků na stejném zařízení jako bylo prováděno broušení. Pouze se použily leštící kotouče a diamantová pasta o zrnitosti  $9\mu\text{m}$  -  $3\mu\text{m}$  -  $1\mu\text{m}$ . Následně byl vzorek opláchnut lihem a vysušen.

Poslední fází přípravy vzorku bylo leptání pomocí leptadla (oxidu hořečnatého). Tato operace se provádí z důvodu zviditelnění struktury dendritů.

Takto připravené metalografické výbrusy byly následně vyfoceny pomocí mikroskopu s fotoaparátem Olympus E 510 (obr. 3.26).



Obr. 3.26: Mikroskop s fotoaparátem Olympus E 510

Pro měření parametru DAS bylo z každého vzorku pořízeno 8 snímků, z nichž bylo pomocí softwaru Olympus Stream Motion z každého snímku změřeno několik os dendritů. Ze získaných hodnot DAS pro každý vzorek byl poté spočítán v programu Microsoft Excel medián těchto hodnot. Výsledkem tedy pro každý vzorek byl celkový součet měřených délek, počet proměřených dendritů a medián hodnot DAS.



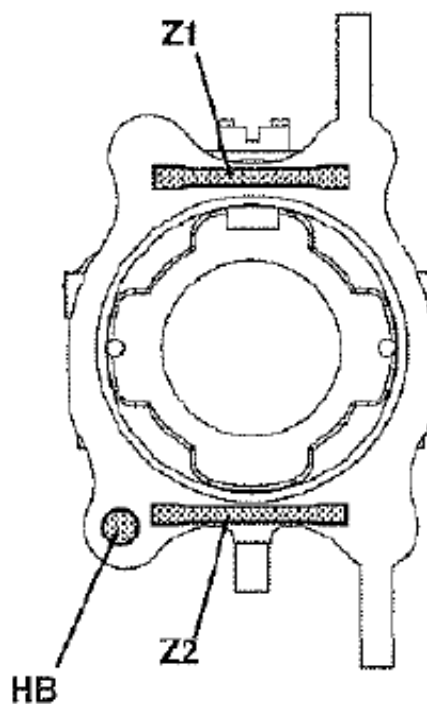
### 3.3.3 Tahová zkouška jednoosým tahem

Vyhodnocení mechanických vlastností bylo prováděno ve společnosti Alucast, s.r.o. na zkušebním stroji značky Zwick (obr. 3.27). Zařízení umožňuje automaticky vyhodnocovat všechny potřebné údaje v programu TestXpert.

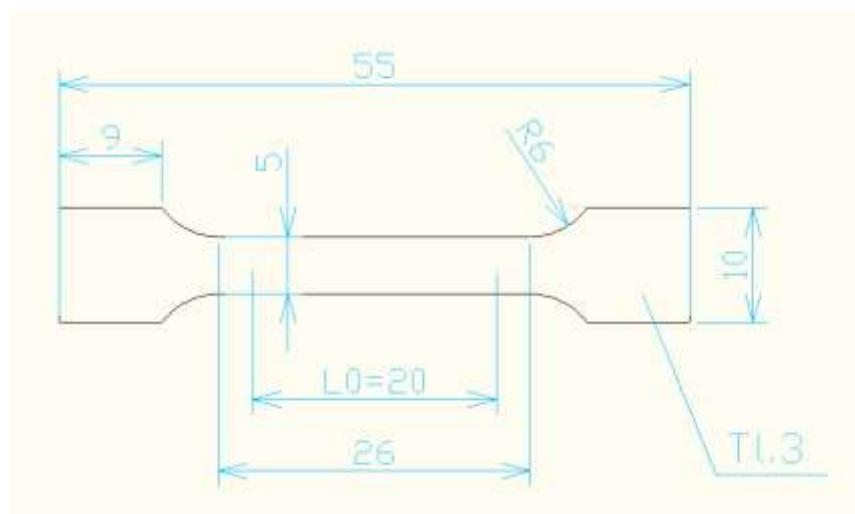


Obr. 3.27: Zařízení Zwick pro tahovou zkoušku

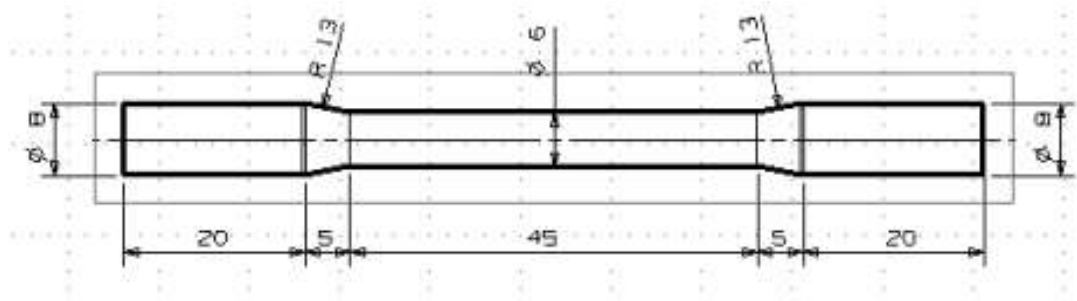
Vyhodnocovány byly jak samostatně lité zkušební tyčinky, tak i vypreparované tyčinky z konkrétního místa odlitku (obr. 3.28). Jedná se o spodní partii odlitku označované Z1 a Z2.



Obr. 3.28: Místa pro tyčinku



Obr. 3.29: Vypreparovaná zkušební tyčinka (dole), rozměry zkušební tyčinky (nahore)



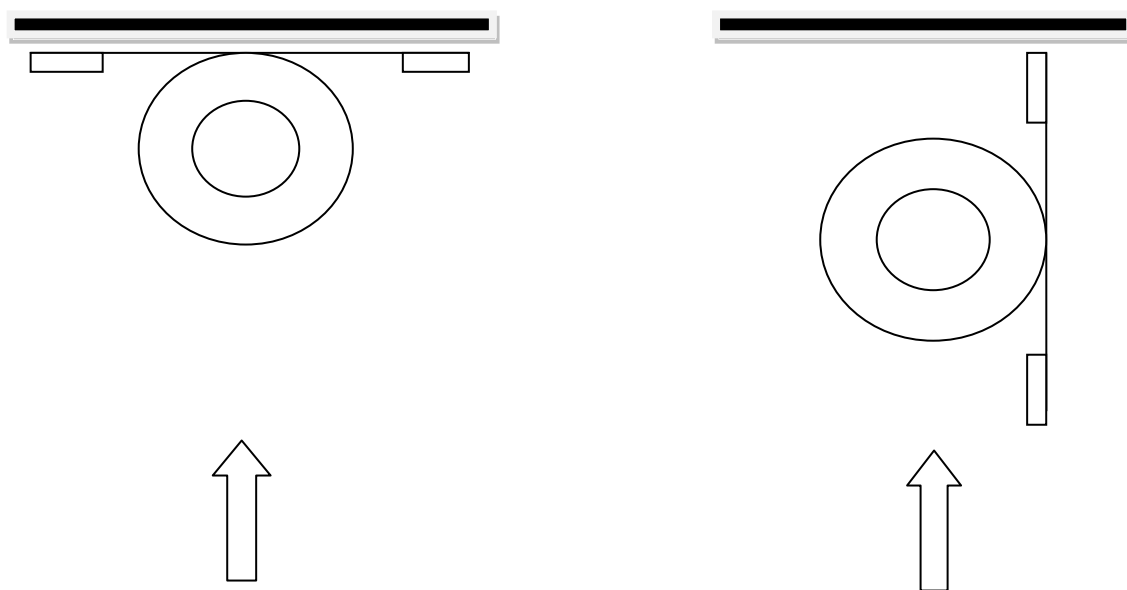
Obr. 3.30: Samostatně lité zkušební tyčinky (dole), rozměry zkušební tyčinky (nahore)

## 4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

### 4.1 Vyhodnocení RTG snímků – před a po HIP

U odlitků určených na technologii HIP se provedla RTG kontrola před tímto procesem a po tomto procesu. Aby bylo možné zaznamenat změny v důsledku použití této technologie. Ověření zda-li technologie HIP dokáže eliminovat vnitřní dutiny.

Každý odlitek byl snímán ve dvou pozicích (zpředu, z boku) obr. 4.1.



1. Pozice (zpředu)

2. Pozice (z boku)

Obr. 4.1: Naznačení směrů prozařování odlitků

Údaje z RTG zařízení při pořizování snímků odlitku:

**159,5 kV**

**2,3 mA**

Hodnocení snímků bylo prováděno dle normy ASTM E155.

Nálezy před HIP technologií:

**1.3.2 B**

horní část odlitku – 2x staženiny - velikost 2

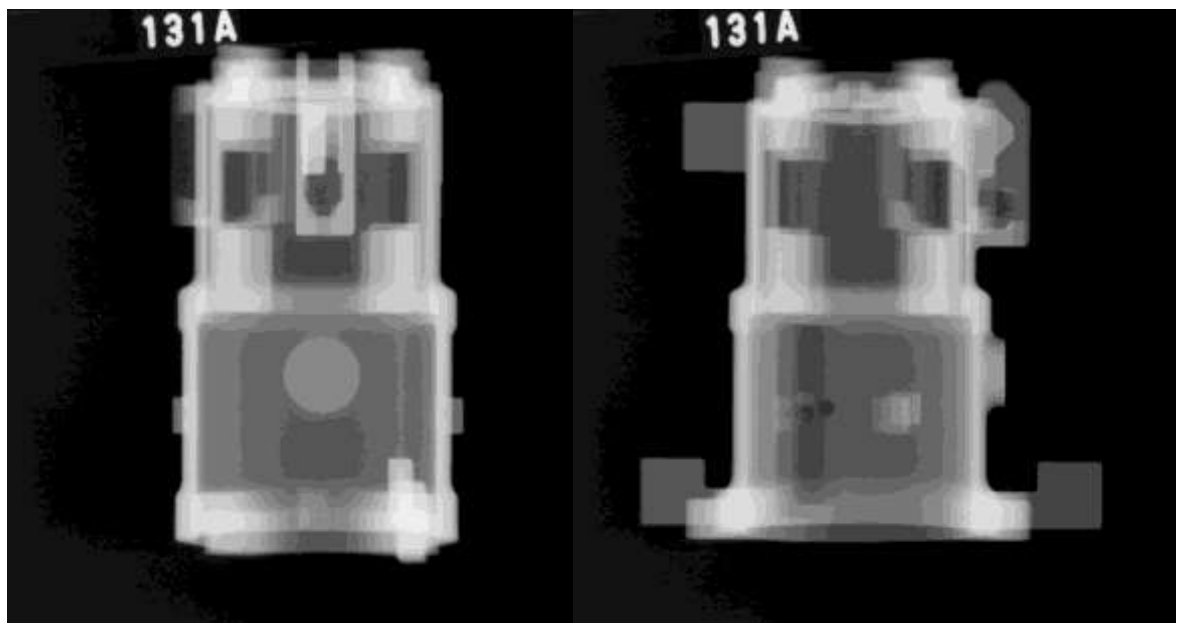
**1.3.2 A**

boční pohled – dolní část uprostřed – bublina - velikost 1

- nahoře (zvětšený pohled) – houbovitá staženina

**3.3.1 A**

boční pohled – staženina uprostřed – velikost 4



Obr. 4.2: RTG snímky odlitků (čelní a boční pohled)

Kromě výše zmíněných tří odlitků s vadami před technologií HIP, byly ostatní zdravé již před použitím technologie HIP. Po provedení technologie HIP byly opět všechny odlitky prozařovány. Především byly kontrolovány odlitky s vadami zjištěnými před technologií HIP. Po kontrole všech odlitků bylo shledáno, že všechny odlitky jsou bez vnitřních vad. Tudíž se prokázalo, že použití technologie HIP má pozitivní vliv na eliminaci vnitřních dutin.



## 4.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů (DAS)

Naměřené hodnoty parametru DAS a jejich medián pro každý vzorek, celková měřená délka a počet proměřených dendritů jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Označení vzorku	Měřená délka	počet dendritů	DAS
	[ $\mu\text{m}$ ]		[ $\mu\text{m}$ ]
PO - LS - 111AD	5594,96	103	55,29
PO - TZ - 121AD	7900,82	159	49,08
PO - HIP+TZ - 132AD	9670,32	211	45,32
JF - LS- 211AD	17823,15	382	47,13
JF - TZ - 2210AD	15663,11	446	34,84
JF - HIP+TZ - 231AD	14824,97	435	34,23
JFK - LS - 311AD	11909,16	400	30,44
JFK - TZ - 3210BD	10973,73	419	26,42
JFK - HIP+TZ - 331AD	13475,38	509	26,12

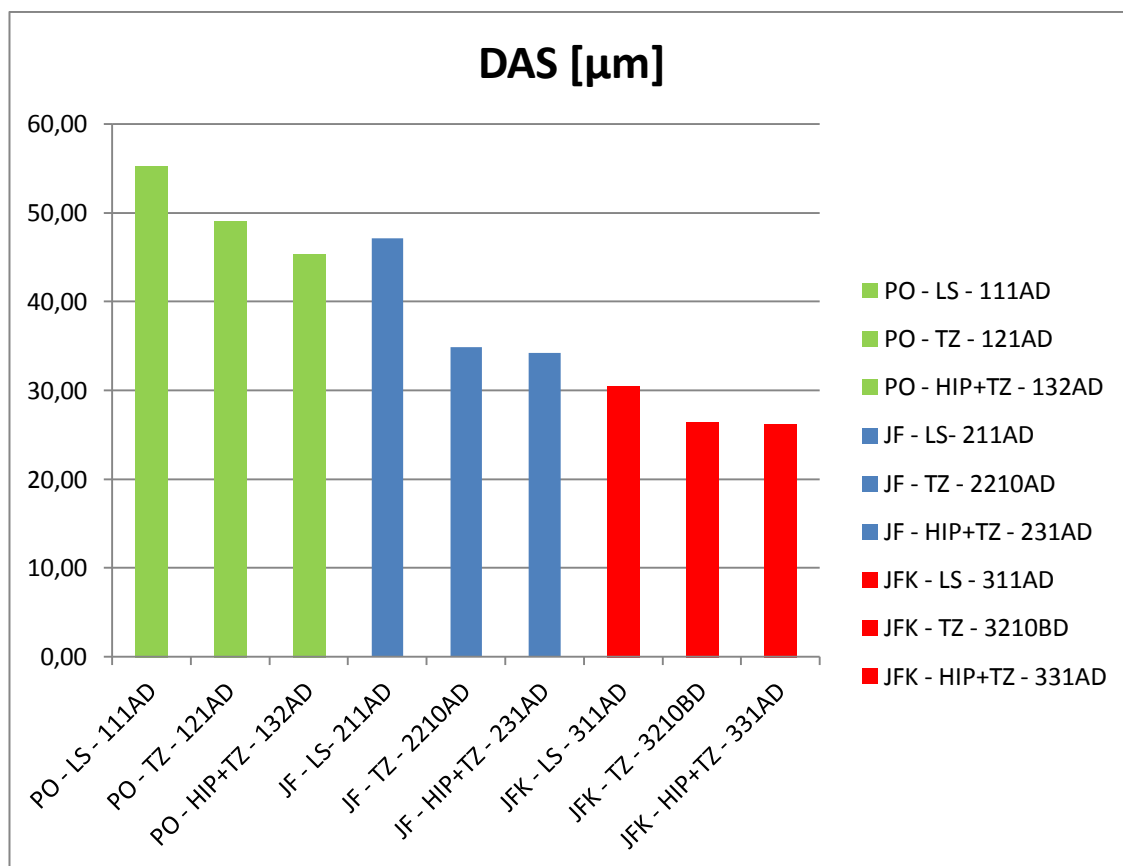
Tab. 4.1: Konečné hodnoty měření DAS

Pro výrobní směr Přirozeného ochlazení (PO), který slouží jako referenční bylo proměřeno méně dendritů než pro zbylé dva výrobní směry a jejich vzorky. A to z důvodu věrohodnějších výsledků pro výsledky hlavních výrobních směrů JFcasting a JFKcasting.

Z výše uvedených výsledků lze konstatovat, že typ ochlazení odlitku má na velikost parametru DAS výrazný vliv. Tento trend lze pozorovat na grafu 4.1. Kdy nejmenších hodnot DAS bylo získáno pomocí technologie JFKcasting.

Z výsledků také vyplývá, že použití tepelného zpracování či kombinace technologie HIP + tepelné zpracování trochu zlepší hodnoty parametru DAS oproti litému stavu (LS). Ovšem porovnáním jednotlivých výsledků mezi TZ a HIP + TZ můžeme konstatovat, že technologie HIP má na zlepšení hodnot DAS velmi malý pozitivní vliv.

Výsledky naměřených hodnot parametru DAS jasně prokazují, že hodnota DAS je závislá pouze a především na rychlosti ochlazování, jak je uvedeno již v kapitole 2.3.3.



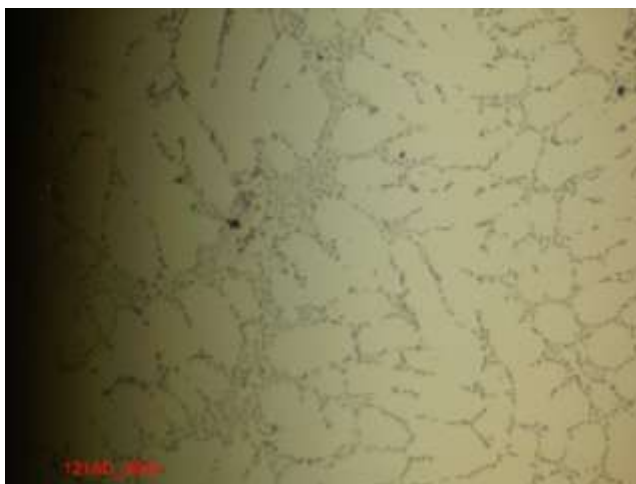
Graf 4.1: Hodnoty DAS pro jednotlivé vzorky

Pro měření parametru DAS byly nafoceny snímky mikrostruktur jednotlivých vzorků. Pro každý výrobní směr (PO, JFcasting a JFKcasting) byly pořízeny snímky v několika zvětšeních. Na těchto snímcích lze pozorovat jednak rozložení strukturních složek homogenního tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a eutektika, ale také vliv technologie HIP na eliminaci porózy. Pro každý výrobní směr je nejprve uveden vzorek v litém stavu (LS), poté s tepelným zpracováním (TZ) a jako poslední je vzorek se zpracováním HIP + TZ. Vzorky jsou zobrazeny v 200x zvětšení.

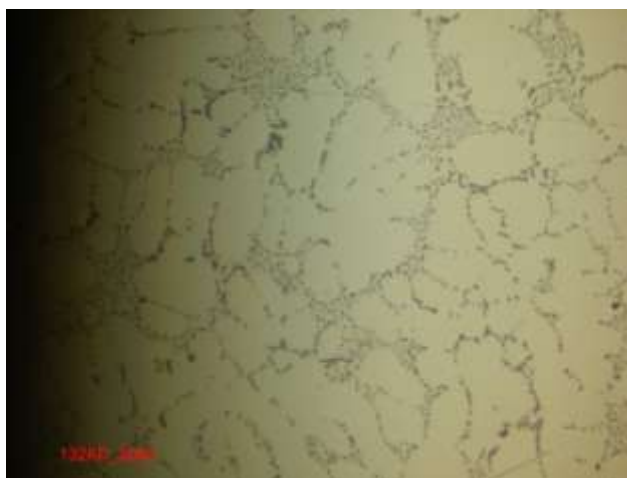
### Přirozené ochlazování (PO)



Obr. 4.3: PO – LS zvětšení 200x



Obr. 4.4: PO – TZ zvětšení 200x



Obr. 4.5: PO – HIP + TZ zvětšení 200x

**JFcasting**

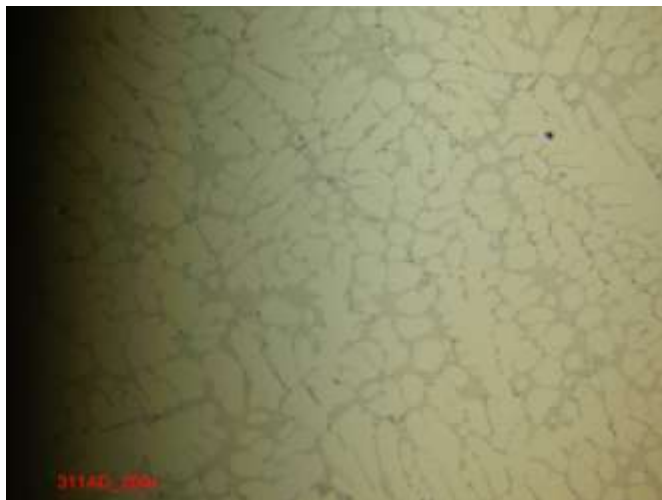
Obr. 4.6: JFcasting - LS zvětšení 200x



Obr. 4.7: JFcasting - TZ zvětšení 200x



Obr. 4.8: JFcasting – HIP + TZ zvětšení 200x

**JFKcasting**

Obr. 4.9: JFKcasting - LS zvětšení 200x



Obr. 4.10: JFKcasting - TZ zvětšení 200x



Obr. 4.11: JFKcasting – HIP + TZ zvětšení 200x

### **4.3 Vyhodnocení mechanických vlastností samostatně litých a vypreparovaných tyčinek**

Vyhodnocení mechanických vlastností se provádělo na samostatně litých zkušebních tyčinkách a na vypreparovaných tyčinkách z odlitku. Ke způsobu zkoušení a typu zkušebního zařízení jsou uvedeny informace v kapitole 3.3.3.

Samostatně litých tyčinek bylo pro každý výrobní směr a typ zpracování vyrobeno 10 kusů. Pro každý výrobní směr a typ zpracování se vypreparovala vždy jeden kus zkušební tyčinky z daného odlitku.

Pro mechanické hodnoty samostatně litých zkušebních tyčinek bylo provedeno testování na hrubé chyby (Grubbsův test), které očistilo výsledné výsledky mechanických vlastností o odlehlé zavádějící hodnoty. Vstupní hodnoty mechanických vlastností a testy hrubých chyb jsou uvedeny v příloze 5. V následujících vyhodnoceních již pracujeme s průměrnými hodnotami jednotlivých vlastností ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A_{50}$ ).

Pro lepší orientaci jsou hodnoty samostatně litých zkušebních tyčinek značeny světlejšími barvami a hodnoty vypreparovaných tyčinek jsou značeny tmavšími barvami.

U samostatně litých zkušebních tyčinek je v popisu uváděn počet zkušebních tyčinek, z kterých se počítala průměrná hodnota.

Vyhodnocení je provedeno pro každý výrobní směr zvlášť z toho důvodu, aby byl jasně zřejmý vliv technologie HIP na mechanické hodnoty pro každý výrobní směr.

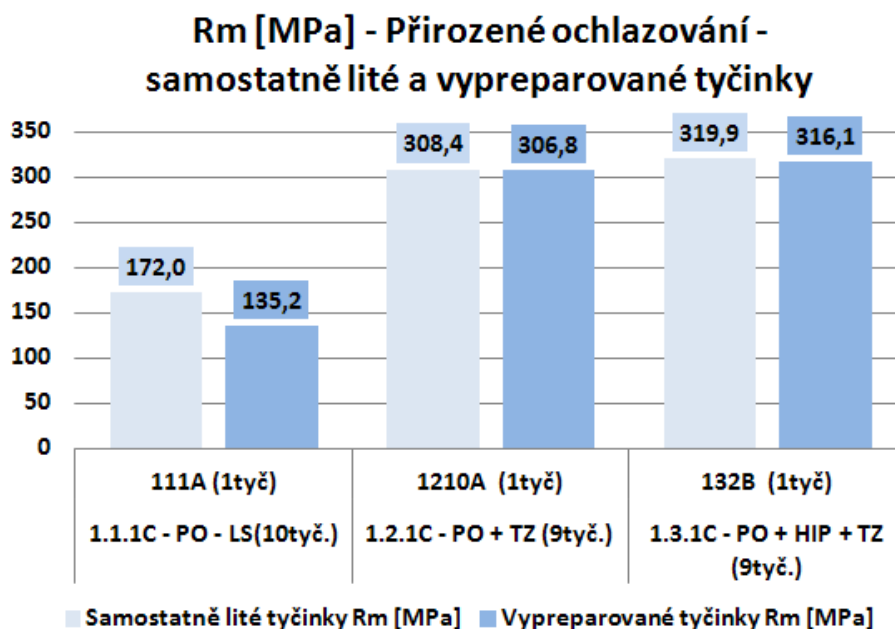
Jako referenční stav je brán litý stav (LS) každého jednotlivého výrobního směru.

### 4.3.1 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných tyčinek – přirozené ochlazování

Výsledné mechanické hodnoty pro výrobní směr Přirozeného ochlazování a jednotlivé druhy zkušebních tyčinek jsou uvedeny v tabulce 4.2.

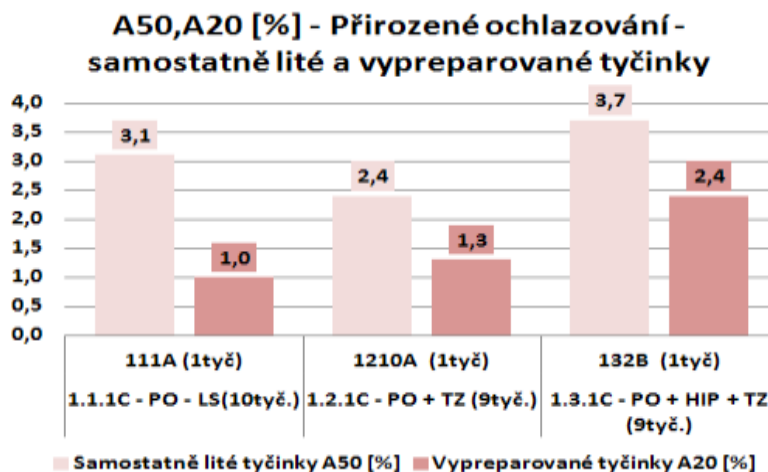
Porovnání Přirozeného ochlazování - různé druhy zpracování		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
Značení samostatně litých tyčinek	Značení vypreparovaných tyčinek	$R_m$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50}$ [%]	$A_{20}$ [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
1.1.1C - PO - LS(10tyč.)	111A (1tyč)	172,0	135,2	3,1	1,0	115,7	112,9
1.2.1C - PO + TZ (9tyč.)	1210A (1tyč)	308,4	306,8	2,4	1,3	269,8	280,7
1.3.1C - PO + HIP + TZ (9tyč.)	132B (1tyč)	319,9	316,1	3,7	2,4	272,7	282,0

Tab. 4.2: Mechanické hodnoty – Přirozené ochlazování (PO)

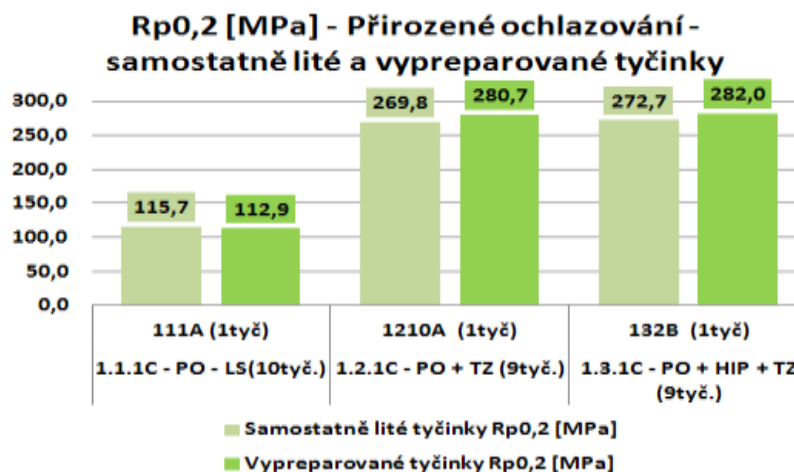


Graf 4.2: Přirozené ochlazování – hodnoty  $R_m$

Hodnota  $R_m$  se příliš neliší pro druh zkušebních tyčinek. Z grafu lze vypočítat výrazné zlepšení hodnot pevnosti po začlenění TZ do výrobního procesu o 79% (samostatně litých tyčinek - ST) a o 126% více u (vypreparovaných tyčinek - VT). Přidáním technologie HIP se hodnoty  $R_m$  zvýší oproti litému stavu o 85% ST a o 133% u VT. Je tedy zřejmé, že výrazného zlepšení hodnot  $R_m$  pro přirozené ochlazování dosáhneme tepelným zpracováním. Technologie HIP zlepšuje vlastnosti o 6% u ST a o 9% u VT, což je zanedbatelné zlepšení.

Graf 4.3: Přirozené ochlazování – hodnoty  $A_{50,20}$ 

Hodnota  $A_{50,20}$  se velmi liší pro druh zkušebních tyčinek. Z grafu lze vyzorovat, že u VT je stoupající trend. Zapojením TZ do výrobního procesu se u VT zlepšila hodnota tažnosti o 30% oproti LS. Přidáním technologie HIP se již tažnost zvýší o 140%. Je zde tedy patrný již výrazný vliv technologie HIP na hodnoty tažnosti a to o 110% oproti TZ. U ST dochází u TZ k poklesu hodnoty tažnosti o 23%. Zato přidáním technologie HIP u ST se hodnota tažnosti zvýšila o 19%.

Graf 4.4: Přirozené ochlazování – hodnoty  $R_{p0,2}$ 

Rozdíl mezi jednotlivými druhy zkušebních tyčinek není patrný. U hodnoty meze kluzu je významný růst při zařazení TZ. A to u ST se jedná o nárůst o 133% a u VT se jedná o 148%. Zařazení technologie HIP se mez kluzu zvýší pouze nepatrně v porovnání s TZ. U ST se jedná o 135% a u VT se jedná o nárůst o 149%. Což nám dává minimální přírůstky hodnoty meze kluzu díky technologii HIP.

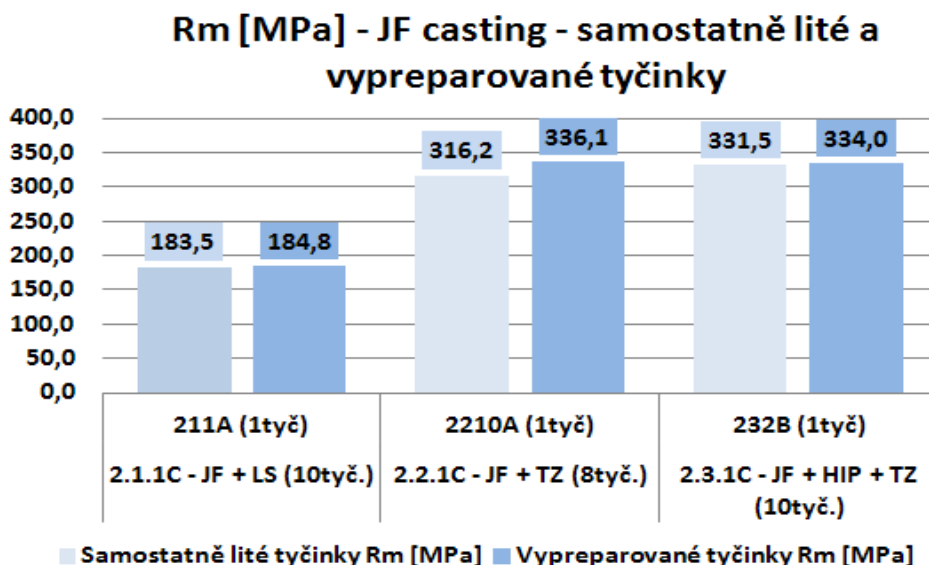


### 4.3.2 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných tyčinek – JF casting

Výsledné mechanické hodnoty pro výrobní směr JFcasting a jednotlivé druhy zkušebních tyčinek jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Porovnání JF casting - různé druhy zpracování		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
Značení samostatně litých tyčinek	Značení vypreparovaných tyčinek	$R_m$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50}$ [%]	$A_{20}$ [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
2.1.1C - JF + LS (10tyč.)	211A (1tyč)	183,5	184,8	5,6	3,1	109,3	130,7
2.2.1C - JF + TZ (8tyč.)	2210A (1tyč)	316,2	336,1	4,3	5,8	265,7	281,8
2.3.1C - JF + HIP + TZ (10tyč.)	232B (1tyč)	331,5	334,0	7,9	5,3	270,8	277,8

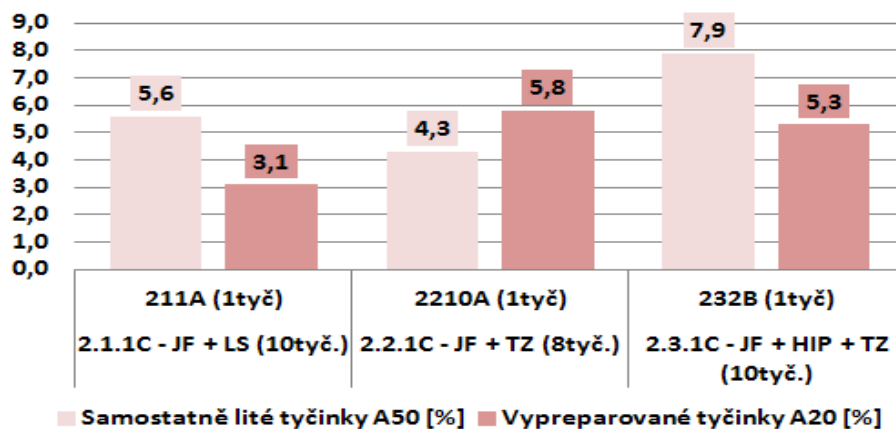
Tab. 4.3: Mechanické hodnoty – JFcasting



Graf 4.5: JFcasting – hodnoty  $R_m$

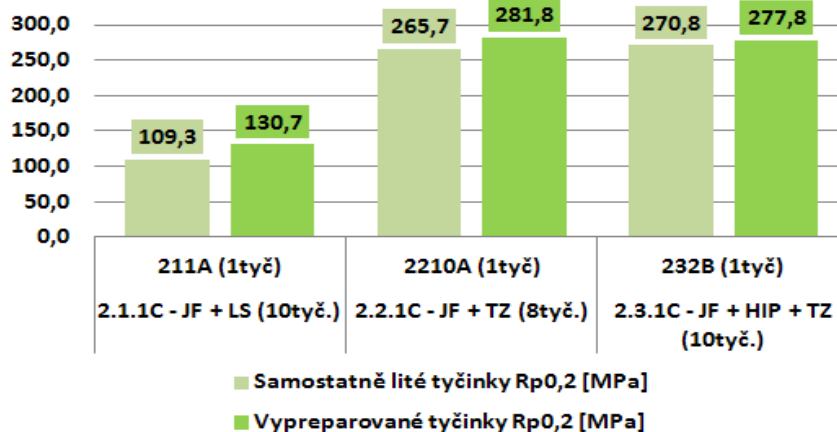
Hodnota  $R_m$  se příliš neliší pro druh zkušebních tyčinek. Z grafu lze vypočítat výrazné zlepšení hodnot pevnosti po začlenění TZ do výrobního procesu o 72% (samostatně litých tyčinek - ST) a o 82% více u (vypreparovaných tyčinek - VT). Přidáním technologie HIP se hodnoty  $R_m$  zvýší oproti litému stavu o 80% ST a o 80% u VT. Je tedy zřejmé, že výrazného zlepšení hodnot  $R_m$  pro JFcasting dosáhneme tepelným zpracováním. Technologie HIP zlepšuje vlastnosti o 8% u ST a u VT došlo k poklesu o 2%. Opět jsme tedy prokázali, že HIP technologie nemá příliš velký zlepšující efekt na hodnoty pevnosti.

### A<sub>50,A20</sub> [%] - JF casting - samostatně lité a vypreparované tyčinky

Graf 4.6: JFcasting – hodnoty A<sub>50,20</sub>

Hodnota A<sub>50,20</sub> se velmi liší pro druh zkušebních tyčinek. Zapojením TZ do výrobního procesu se u VT zlepší hodnota tažnosti o 87% oproti LS. Přidáním technologie HIP se tažnost u VT zvýší o 70%. U ST dochází při TZ k poklesu hodnoty tažnosti o 24%. Zato přidáním technologie HIP u ST se hodnota tažnosti zvýšila o 41%.

### R<sub>p0,2</sub> [MPa] - JF casting - samostatně lité a vypreparované tyčinky

Graf 4.7: JFcasting – hodnoty R<sub>p0,2</sub>

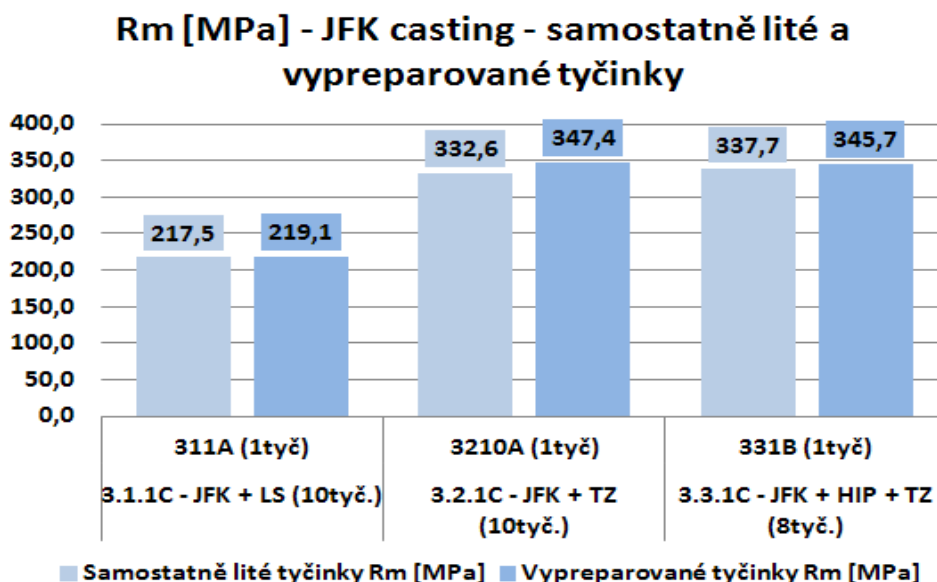
Stejně jako u přirozeného ochlazování i u JFcasting není patrný výrazný rozdíl mezi druhem zkušebních tyčinek. Díky TZ se hodnoty R<sub>p0,2</sub> zvýšily u ST o 143% a u VT o 115%. Technologie HIP u ST navýšila hodnotu meze kluzu o 147% a u VT hodnoty meze kluzu o 112%. I při výrobním směru JFcasting nedošlo k výraznému zlepšení hodnot meze kluzu díky technologii HIP.

### 4.3.3 Porovnání výsledků samostatně litých a vypreparovaných tyčinek – JFK casting

Výsledné mechanické hodnoty pro výrobní směr JFKcasting a jednotlivé druhy zkušebních tyčinek jsou uvedeny v tabulce 4.4.

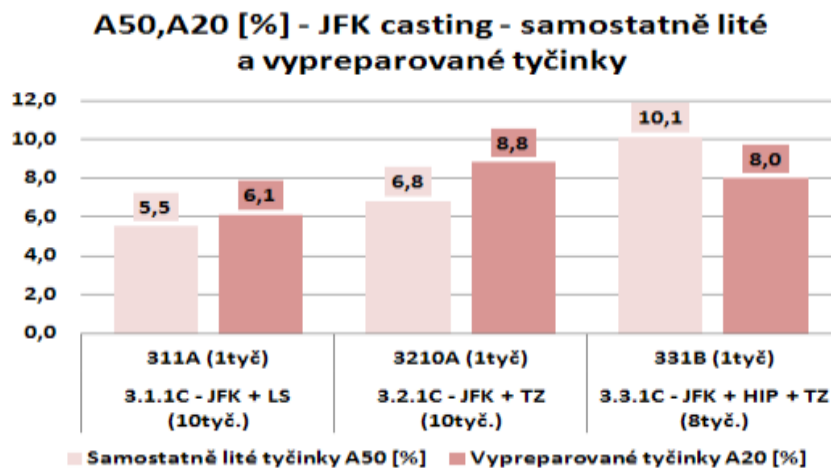
Porovnání JFK casting - různé druhy zpracování		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
Značení samostatně litých tyčinek	Značení vypreparovaných tyčinek	$R_m$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50}$ [%]	$A_{20}$ [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
3.1.1C - JFK + LS (10tyč.)	311A (1tyč)	217,5	219,1	5,5	6,1	133,0	135,9
3.2.1C - JFK + TZ (10tyč.)	3210A (1tyč)	332,6	347,4	6,8	8,8	270,3	287,8
3.3.1C - JFK + HIP + TZ (8tyč.)	331B (1tyč)	337,7	345,7	10,1	8,0	269,8	286,6

Tab. 4.4: Mechanické hodnoty – JFKcasting



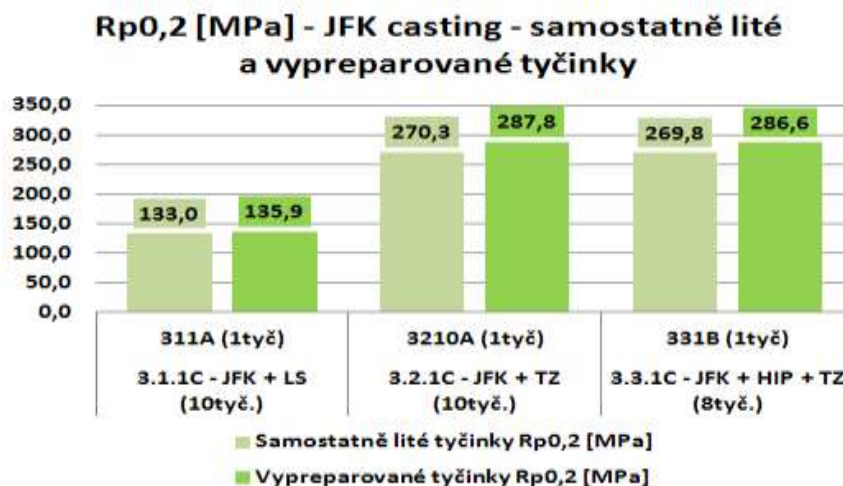
Graf 4.8: JFKcasting – hodnoty  $R_m$

Hodnota  $R_m$  se příliš neliší pro druh zkušebních tyčinek. Z grafu lze vypočítat výrazné zlepšení hodnot pevnosti po začlenění TZ do výrobního procesu o 53% (samostatně litých tyčinek - ST) a o 58% více u (vypreparovaných tyčinek - VT). Přidáním technologie HIP se hodnoty  $R_m$  zvýší oproti litému stavu o 55% ST a o 57% u VT. Je tedy zřejmé, že výrazného zlepšení hodnot  $R_m$  pro přirozené ochlazování dosáhneme tepelným zpracováním. Technologie HIP zlepšit vlastnosti o 2% u ST a u VT dojde k poklesu o 1%. Opět jsme tedy prokázali, že HIP technologie nemá výrazný vliv na zlepšení hodnot pevnosti.

Graf 4.9: JFKcasting – hodnoty  $A_{50,20}$ 

Hodnoty tažnosti se u jednotlivých druhů tyčinek u JFKcasting příliš neliší. U ST můžeme pozorovat stoupající trend hodnot tažnosti. Začleněním TZ u ST stoupne hodnota tažnosti o 23% oproti LS. Přidáním technologie HIP u ST se dosáhne zvýšení hodnot tažnosti až o 84%. VT mají kolísající tendenci. Díky TZ se u VT hodnota tažnosti zvýší o 44%. Ovšem přidáním technologie HIP již dosáhneme pouze zvýšení tažnosti o 31%.

Jak u VT tak i u ST přidáním TZ nebo HIP + TZ dosáhneme zvýšení hodnot tažnosti.

Graf 4.10: JFKcasting – hodnoty  $R_{p0,2}$ 

Také u výrobního směru JFKcasting není patrný vliv druhu zkušební tyčinky na výsledné hodnoty. Díky TZ se hodnoty  $R_{p0,2}$  u ST zvýší o 103% u VT o 111%. Technologie HIP + TZ zvýší hodnoty meze kluzu o něco méně než pouze použitím TZ. Konkrétně u ST o 102% a u VT o 110%. Hodnoty meze kluzu se s použitím technologie HIP příliš nezvýší.

### Porovnání výrobních směrů a jejich zpracování

Pro přehled a lepší porovnání, který výrobní směr je nejlepší na mechanické vlastnosti jsou v tabulce 4.5 uvedeny jednotlivé výrobní směry a dané druhy zpracování.

Porovnání litých stavů jednotlivých výrobních směrů		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
		R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]	A <sub>20</sub> [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]
1.1.1C - PO - LS	111A	172,0	135,2	3,1	1,0	115,7	112,9
2.1.1C - JF - LS	211A	183,5	184,8	5,6	3,1	109,3	130,7
3.1.1C - JFK - LS	311A	217,5	219,1	5,5	6,1	133,0	135,9
Porovnání tepelného zpracování jednotlivých výrobních směrů		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
		R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]	A <sub>20</sub> [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]
1.2.1C - PO + TZ	1210A	308,4	306,8	2,4	1,3	269,8	280,7
2.2.1C - JF + TZ	2210A	316,2	336,1	4,3	5,8	265,7	281,8
3.2.1C - JFK + TZ	3210A	332,6	347,4	6,8	8,8	270,3	287,8
Porovnání HIP + TZ pro jednotlivé výrobní směry		Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky	Samostatně lité tyčinky	Vypreparované tyčinky
		R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]	A <sub>20</sub> [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]
1.3.1C - AC + HIP + TZ	132B	319,9	316,1	3,7	2,4	272,7	282,0
2.3.1C - JF + HIP + TZ	232B	331,5	334,0	7,9	5,3	270,8	277,8
3.3.1C - JFK + HIP + TZ	331B	337,7	345,7	10,1	8,0	269,8	286,6

Tab. 4.5: Porovnání jednotlivých výrobních směrů a jejich zpracování

Porovnání výsledků mechanických hodnot pro litý stav (LS) jednotlivých výrobních směrů jasně ukazuje, jako nejlepší výrobní postup JFKcasting.

Porovnáním výsledků mechanických hodnot pro tepelné zpracování (TZ) jednotlivých výrobních směrů opět dostaneme, jako nejlepší výrobní postup JFKcasting. Ovšem výborných mechanických vlastností dosahuje také výrobní směr JFcasting.

Poslední porovnání mechanických hodnot pro technologii HIP a tepelné zpracování (HIP + TZ) opět jasně vítězí výrobní směr JFKcasting.

Z výsledků lze konstatovat, že požadované minimální hodnoty R<sub>m</sub>=280 MPa, R<sub>p0,2</sub> = 240 MPa a A<sub>5</sub> = 3,5 % dosahují tyto výrobní směry a způsoby zpracování: JFcasting + TZ

JFKcasting + TZ

JFcasting + HIP + TZ

JFKcasting + HIP + TZ

## 5 ZÁVĚR

Hlavním úkolem diplomové práce bylo prokázat, zda-li zařazení technologie HIP do výrobního procesu bude mít pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

K ověření tohoto tvrzení byl vybrán odlitek pro letecký průmysl z materiálu EN AC-AISi7Mg0,6, který byl vyráběn třemi výrobními směry (Přirození ochlazování, JFcasting, JFKcasting) a dále byl zpracováván pomocí tepelného zpracování a technologie HIP, pouze tepelného zpracování, či byl ponechán v litém stavu jako referenční. K vyhodnocování byly použity samostatně lití zkušební tyčinky i tyčinky vypreparované z kritických míst odlitku. Dílčím cílem bylo dosáhnout požadovaných mechanických vlastností dle požadavků zákazníka a snaha získat co nejvyšší hodnoty, k nimž by měla přispět i technologie HIP.

Pro zajištění kvality taveniny byly použity pouze housky přímo od dodavatele s garantovaným chemickým složením. Tavenina byla náležitě připravena – dolegována hořčíkem, ošetřena rafinační solí, odplyněna, očkovaná, kontrolována teplota a další parametry stejně jako výroba voskových modelu a skořepinových forem. Správným odplyněním se dosáhlo naměřit na zkušebních tělesech nízké hodnoty Dichte indexu – 0,2268 %. Což značí dobře odplyněnou taveninu a nízký obsah bublin.

Pro určení optimálního tepelného zpracování bylo odlito 7 sad zkušebních tyčinek, které byly následně tepelně zpracovány a z výsledků mechanických hodnot jednotlivých sad, bylo jako optimální čas pro TZ umělé stárnutí určena doba 8 hodin při výdrži na 160°C.

Pro ověření účinnosti technologie HIP byly odlitky před touto operací podrobeny prozařování na RTG zařízení. Před zpracováním technologií HIP byly na několika odlitcích nalezeny necelistvosti (řediny, bubliny, ...). Po opětovné kontrole na RTG zařízení po zpracování odlitků technologií HIP. Nebyly již nalezeny v daných partiích žádné necelistvosti. Touto kontrolou tedy byla potvrzena schopnost technologie HIP zlepšovat vnitřní jakost odlitků.

Po provedení jednotlivých typů konečného zpracování odlitků a zkušebních tyčinek byly odebrány vzorky na metalografii, pro měření parametru DAS a kontrolu struktury daných odlitků. Hodnoty parametru DAS měly korespondovat s výsledky mechanických hodnot ze zkušebních tyčinek. Výsledné hodnoty DAS pro dané výrobní směry (PO = 49,08  $\mu\text{m}$ ; JFcasting = 34,84  $\mu\text{m}$ ; JFKcasting = 26,42  $\mu\text{m}$ ) korespondovaly s dosaženými mechanickými vlastnosti ze zkušebních tyčinek (tabulka 4.1).

Po přípravě zkušebních tyčinek z vybraných odlitků a samostatných zkušebních tyčinek bylo provedeno vyhodnocení mechanických vlastností, pro jednotlivé výrobní směry a druhy zpracování. Výsledky samostatně litých zkušebních tyčinek a vypreparovaných tyčinek ve většině hodnot korespondovaly. Což bylo překvapivé, protože mechanické hodnoty z tyčinek z odlitku bývají horší. Toto příjemné překvapení bylo způsobeno zřejmě díky pečlivému dodržení technologického postupu během výrobního procesu. Nejvyšších mechanických hodnoty  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a  $A_5$  bylo dosaženo pomocí výrobního směru JFKcasting a zpracování HIP+TZ, kde získané hodnoty vysoce přesahovaly požadované. Dalšími výrobními směry a zpracováním, které dosáhly vyšších hodnot, než byly požadovány byly: JFKcasting + TZ, JFcasting + HIP + TZ a JFcasting + TZ. Díky těmto výsledkům má společnost Alucast, s.r.o. možnost volby ideálního výrobního cyklu, dle požadavků zákazníka a ekonomiky výroby. Pozitivním přínosem je zjištění, že výrobní směr JFKcasting + TZ dosahuje stejných vlastností jako výrobní směr JFcasting + HIP + TZ. Což umožňuje variabilitu výroby a možnost použití ideálního ekonomicky výhodného řešení pro daný odlitek.

Hlavní cíl diplomové práce měl prokázat, že technologie HIP má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti. Tento cíl byl splněn a prokázán na výsledcích pro jednotlivé výrobní směry a druhy zpracování. Obecně lze konstatovat, že technologie HIP má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti odlitku, a to především na zlepšení tažnosti, hodnoty meze pevnosti a meze kluzu jsou též díky zapojení této technologie zlepšeny ovšem nepatrně. Zatímco hodnoty tažnosti díky technologii HIP se zlepšovaly skokově.

Porovnáním celkového přínosu tepelného zpracování a technologie HIP na mechanické vlastnosti odlitku. Má hlavní podíl hlavně použití tepelného zpracování, technologie HIP dokáže pouze mírně zvýšit hodnoty  $R_m$  a  $R_{p0,2}$ , ovšem doplňuje tepelné zpracování tím, že dokáže zlepšit tažnost. Proto používání kombinace těchto typů zpracování odlitků je pozitivní na mechanické hodnoty a nabízí širší možnosti slévárnám při plnění velmi rozmanitých požadavků zákazníků.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. History. *Dal-Air castings* [online]. 2012 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.dalaircasting.com/investment-castings/history/>
2. History of Investment Casting. *Invest Cast, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: [http://www.proivc.com/history\\_of\\_investment\\_casting.php](http://www.proivc.com/history_of_investment_casting.php)
3. The history of Investment casting. *Metrocast Italiana s.p.a.* [online]. 2009 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.metrocast.it/inglese/history.html>
4. HORÁČEK, M. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta Strojního Inženýrství, 2009 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
5. Investment casting. *Zollern* [online]. 2012 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: [http://www.zollern.de/fileadmin/Upload\\_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting\\_and\\_Forging/Feinguss\\_us.pdf](http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Feinguss_us.pdf)
6. ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
7. Slévárenství - teorie. [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_slevarenstvi/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm)
8. Hot Isostatic Pressing: Today and Tomorrow. *Hasmak.com* [online]. 2008 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://hasmak.com.tr/tozpdf/HIP-Today-and-Tomorrow.pdf>
9. *Odstraňování vnitřních dutin v odlitcích metodou HIP* [pdf]. 2006, 3 s. [cit. 24.4.2012].
10. Hot Isostatic Pressing of Near Net Shaped Parts. *Hempel-metals.com* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.hempel-metals.com/UserFiles/File/hot%20isostatic%20pressing.pdf>
11. Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of Materials Science* [online]. 2004, roč. 39, č. 21 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/rh3x51m77631152l/?MUD=MP>

12. Application of HIP technology. *Nippon Tungsten* [online]. 2006 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.nittan.co.jp/en/tech/techinfo/hip.html>
13. Uniform Rapid Cooling. *Avure technologies* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/avure-technologies-inc/avure-hot-isostatic-presses/16238-127476-5.html>
14. Growth at Kittyhawk Products Reflects Expansion of HIP Industry. *Incast*. 2000, XIII, č. 7. ISSN 1045-5779.
15. BODYCOTE. *An introduction of Bodycote*. 2011.
16. JULIŠ, M., T. PODRÁBSKÝ a M. HRČKOVÁ. ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ. *JF Casting a JF Casting liquid - technologie řízeného ochlazování vysokopevnostních Al odlitků*. Brno, 2012.
17. Bodycote. *Densal* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://hipna.bodycote.com/index.asp?sid=process&content=process.asp?ID=247>
18. Densal and Densal II. *Bodycote* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.densal.com/>
19. Furnaces. *Ahip.com* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.ahip.com/WebPages/furnaces.htm>
20. Zkušenosti se zjišťováním plynů v tavenině. [online]. 2009 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [http://www.rgu.cz/download/holecek2009/12\\_prednaska.pdf](http://www.rgu.cz/download/holecek2009/12_prednaska.pdf)
21. Podtlaková zkouška hustoty hliníku. [online]. 2009 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [http://www.rgu.cz/download/holecek2009/13\\_prednaska.pdf](http://www.rgu.cz/download/holecek2009/13_prednaska.pdf)
22. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. ISBN 80-7204-283-1.
23. Co je tvrdé?. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.quido.cz/fyzika/120fyzika.htm>
24. Počítačová radiografie (CR) a digitální radiografie (DR). *ATG* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.atg.cz/ndt-115?PHPSESSID=9394adabef742f5f4b51dd903f530377>
25. Statické zkoušky. *ZCU.CZ* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>

26. TECHNOLOGIE PRO STUDIJNÍ OBOR MS. [online]. [cit. 2012-04-25].  
Dostupné z: <http://ljinfo.blogspot.com/>
27. Metalografie I. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z:  
[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)
28. ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: SVÚM, 2010.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
HIP		Hot Isostatic Pressing (Izostatické lisování za tepla)
$\alpha(\text{Al})$		Homogenní tuhý roztok
DAS	$\mu\text{m}$	Dendrite Arm Spacing
a		Konstanta
n		Konstatnta
$t_f$		Místní doba tuhnutí
$R_m$	MPa	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Mez kluzu
$A_5$	%	Tažnost
HB		Tvrdost dle Brinella
FDU		Foundry degasing unit
URC		Uniform rapid cooling
DI		Dichte index
$\rho_R$	$\text{g/cm}^3$	hustota vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku
$\rho_V$	$\text{g/cm}^3$	hustota vzorku ztuhlého ve vakuu 80 mbar (8kPa)
$\rho_{\text{vody}}$	$\text{g/cm}^3$	hustota vody
$m_{\text{RAT}}$	g	hmotnost vzorku R, váženého v atmosféře
$m_{\text{RVO}}$	g	hmotnost vzorku R, váženého ve vodě
$m_{\text{VAT}}$	g	hmotnost vzorku V, váženého v atmosféře
$m_{\text{VVO}}$	g	hmotnost vzorku V, váženého ve vodě
D, d	mm	Průměry

$F_m$	N	Zatěžující síla
$S_o$	$\text{mm}^2$	Průřez
NDT		Non destructive testing
Z	%	Kontrakce
TZ		Tepelné zpracování
PO		Přirozené ochlazování
LS		Litý stav
T6		TZ na max. pevnost a tažnost
T64		TZ na max. houževnatost
US		Umělé stárnutí
Z1		Pozice vypreparované tyčinky
Z2		Pozice vypreparované tyčinky
$L_o$		Měřená délka zk. tyčinky
TI.	mm	Tloušťka
ST		Samostatně litá zkušební tyčinka
VT		Vypreparovaná zkušební tyčinka

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 ... chemické složení housek EN AC- AlSi7Mg0,3
- Příloha 2 ... chemické složení taveniny do dolegování hořčíku
- Příloha 3 ... chemické složení taveniny po očkování
- Příloha 4 ... mechanické hodnoty – zkouška optimálního TZ
- Příloha 5 ... mechanické hodnoty – samostatně lité zkušební tyčinky

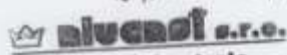
# Příloha 1

10.1.2012 15:57:59

## QMatrix Analysis Results

### Popis vzorku

Quality	AISI7Mg0.3		SampleNo	Prej. vstup. mat. HOUSKA						
	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
↑		0.1	0.45	7.5	0.25	0.1	0.05	0.1		
□	92.72	<0.0010	0.354	6.617	0.124	0.028	<0.0020	0.010	<0.0050	<0.0020
□			0.25	6.5						
	Ti	Cr	Ag	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
↑	0.2									
□	0.131	<0.0020	<10.00	<10.00	<10.00	<20.00	<30.00	15.06	<20.00	<20.00
□	0.1									
	Ga	In	Li	Mo	Na	Sr	V	Zr		
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
↑										
□	134.10	0.0	<10.00	0.0	5.223	<10.00	58.27	17.13		
□										

BATEH OILIK  
  
 vstupní kontrola  
 KONFORMACE  
 Juc

## Příloha 2

13.1.2012 14:37:58

### QMatrix Analysis Results

Popis vzorku										
Quality	AlSi7Mg0.6				SampleNo			11871		
	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
↑		0.2	0.7	7.5	0.2	0.1	0.05	0.1		
☐	<b>92.22</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.530</b>	<b>6.937</b>	<b>0.130</b>	<b>0.035</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.014</b>	<b>0.0052</b>	<b>&lt;0.0020</b>
☐			0.45	6.5						
	Ti	Cr	Ag	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
↑	0.2									
☐	<b>0.121</b>	<b>0.0025</b>	<b>&lt;10.00</b>	<b>&lt;10.00</b>	<b>&lt;10.00</b>	<b>&lt;20.00</b>	<b>&lt;30.00</b>	<b>11.78</b>	<b>&lt;20.00</b>	<b>&lt;20.00</b>
☐	0.1									
	Ga	In	Li	Mo	Na	Sr	V	Zr		
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
↑										
☐	<b>139.92</b>	<b>0.0</b>	<b>&lt;10.00</b>	<b>0.0</b>	<b>6.130</b>	<b>&lt;10.00</b>	<b>86.05</b>	<b>18.86</b>		
☐										



Příloha 3

13.1.2012 14:41:25

### QMatrix Analysis Results

Popis vzorku

Quality                      AlSi7Mg0,6                      SampleNo                      11871 A

	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

↑		0.2	0.7	7.5	0.2	0.1	0.05	0.1		
☐	92.29	0.0016	0.511	6.865	0.127	0.035	<0.0020	0.013	0.0051	<0.0020
☐			0.45	6.5						

	Ti	Cr	Ag	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co
	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

↑	0.2									
☐	0.149	0.0024	<10.00	<10.00	<10.00	<20.00	<30.00	11.71	<20.00	<20.00
☐	0.1									

	Ga	In	Li	Mo	Na	Sr	V	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

↑								
☐	145.73	0.0	<10.00	0.0	14.06	<10.00	95.91	18.78
☐								

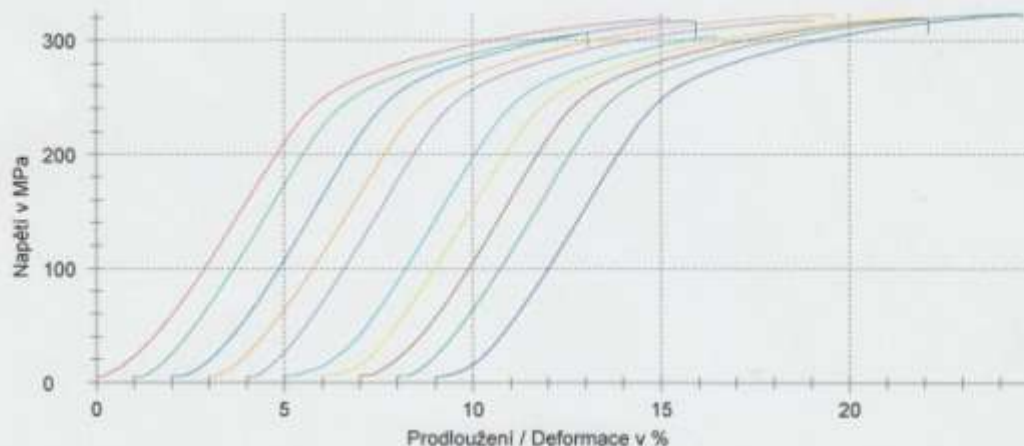
## Mechanické vlastnosti

Tavba : 11871 Typ vzorku :  
 Datum liti : 12.1.2012 Poznámky... : tycinky c. 222C, 4h US  
 Materiál : AlSi7Mg0,6  
 Předzatižení : 5 MPa Rychlost do meze kluzu : 10 MPa/s  
 Rychlost pro E-Modul : 10 MPa/s Rychlost zkoušky : 0,005 1/s

### Výsledky zkoušek:

Nr	Tavba	d <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	L <sub>0</sub> mm	A <sub>5</sub> %	R <sub>p0,2</sub> MPa	00102P R002P 2 2 } 10m nepokročily! upraveno 0.12.12 2 2
1	11871	6,00	28,27	9022,02	319,1	50,00	8,3	241,7	2
2		6,00	28,27	8659,95	306,3	50,00	5,9	238,2	2
3		6,00	28,27	8979,59	317,6	50,00	7,4	242,5	2
4		6,00	28,27	9117,62	322,5	50,00	9,7	242,9	2
5		6,00	28,27	8977,38	317,5	50,00	8,5	239,6	2
6		6,00	28,27	8594,02	304,0	50,00	4,6	241,2	2
7		6,00	28,27	9050,40	320,1	50,00	8,4	242,1	2
8		6,00	28,27	9037,82	319,6	50,00	8,5	241,5	2
9		6,00	28,27	9138,27	323,2	50,00	9,8	243,4	2
10		6,00	28,27	9120,04	322,6	50,00	8,6	242,8	2

### Grafické záznamy série:



### Statistika:

11871 n = 10	d <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	L <sub>0</sub> mm	A <sub>5</sub> %	E GPa	R <sub>p0,2</sub> MPa
$\bar{x}$	6,00	28,27	8969,71	317,2	50,00	8,0	0	241,6
$s$	0,00	0,00	189,74	6,7	0,00	1,6	0	1,6
$v$	0,00	0,00	2,12	2,12	0,00	20,36	1,86	0,67

















## Příloha 5 – a

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 1.1.1C

tavba: 11871  
datum liti: 12.1.2012  
material: AlSi7Mg0,6  
poznámka: 1.1.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	170,6	3,0	113,1	
2	171,4	2,9	116,7	
3	171,3	3,0	115,6	
4	173,8	3,4	115,0	
5	170,2	3,1	113,0	
6	172,4	3,1	116,3	
7	177,4	3,5	123,2	
8	169,8	2,8	113,8	
9	171,0	3,1	115,0	
10	172,2	3,2	115,7	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
1,45419 1,829465 2,294

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	172	3,1	115,7
s	2,2	0,2	2,9
v	1,29	6,58	2,51

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	172,0	3,1	115,7
s	2,109	0,202	2,761

odmocnina  
0,9

## Příloha 5 – b

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 1.2.1C

tavba: 11871  
datum liti: 12.1.2012  
material: AISi7Mg0,6  
poznámka: 1.2.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	304,9	1,5	272,3	
2	306,8	2,6	266,3	
3	311,9	2,5	270,7	
4	305,1	2,2	267,7	
5	305,7	2,4	267,7	
6	314,9	3,6	271,7	
7	odebrana hodnota z duvodu zaporne hodnoty A5			
8	304,6	2,3	266,1	
9	311,1	2,5	272,3	
10	310,9	2,3	273,0	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=9  
1,718406 2,148007 2,237

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	308,4	2,4	269,8
s	4,0	1,4	2,8
v	1,30		1,03

#### Grubssův test:

n=9	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	308,4	2,4	269,8
s	3,582	0,512	2,623

odmocnina  
0,888888889

## Příloha 5 – c

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 1.3.1C

tavba: 11871  
datum liti: 12.1.2012  
material: AlSi7Mg0,6  
poznámka: 1.3.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	317,2	3,6	269,3	
2	323,9	5,3	272,9	
3	320,9	3,5	274,9	
4	325,9	4,2	277,0	
5	320,2	3,7	274,0	
6	319,0	3,9	270,8	
7	319,3	3,9	272,0	
8	320,2	3,7	272,9	
9	319,5	4,0	271,1	
10	317,1	2,9	272,7	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
1,582597 2,333107 2,294

GA5min GA5max Gkrit n=9  
2,178619 1,31314 2,237

GA5max je vyšší než Gkrit,  
proto hodnoty číslo 2

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	320,3	3,9	272,8
s	2,8	0,6	2,2
v	0,86	15,69	0,81

Hodnoty jsou pod kritickou  
hodnotou na hladině  
významnosti Alfa-0,05, proto  
nulovou hypotézu  
nezamítáme. A můžeme  
počítat se všemi hodnotami.

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	odmocnina
$\bar{x}$	320,3	3,9	272,8	0,9
s	2,605	0,581	2,080	

n=9	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	odmocnina
$\bar{x}$	319,9	3,7	272,7	0,888888889
s	2,441	0,351	2,192	

## Příloha 5 – d

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 2.1.1C

tavba: 11871  
datum liti: 12.1.2012  
material: AlSi7Mg0,6  
poznámka: 2.1.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	182,8	6,3	106,5	
2	183,2	6,2	108,3	
3	180,1	4,9	107,2	
4	184,2	5,8	109,0	
5	182,7	4,7	110,2	
6	181,4	5,3	107,8	
7	185,0	5,4	110,6	
8	183,0	6,5	104,1	
9	185,9	5,2	114,6	
10	186,2	5,3	114,4	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
1,406668 1,537521 2,294

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	183,4	5,6	109,3
s	1,9	0,6	3,3
v	1,04	10,67	3,04

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	183,5	5,6	109,3
s	1,822	0,580	3,150

odmocnina

0,9

## Příloha 5 – e

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 2.2.1C

**tavba:** 11871  
**datum liti:** 12.1.2012  
**material:** AlSi7Mg0,6  
**poznámka:** 2.2.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	304,9	2,6	264,5	
2	319,2	4,6	266,2	
3	324,2	5,7	267,5	
4	odebrano - vmestek			
5	odebrano - vmestek			
6	308,8	3,4	263,3	
7	322,8	5,5	268,0	
8	321,4	5,1	265,4	
9	315,8	4,2	264,8	
10	312,5	3,1	265,8	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=8  
1,455147 1,237961 2,172

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	316,2	4,3	265,7
s	11,6	1,5	2,8
v	3,73	41,25	1,07

#### Grubssův test:

n=8	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	316,2	4,3	265,7
s	6,518	1,077	1,453

odmocnina  
0,875

## Příloha 5 – f

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 2.3.1C

**tavba:** 11871  
**datum liti:** 12.1.2012  
**material:** AlSi7Mg0,6  
**poznámka:** 2.3.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	333,2	7,2	270,3	
2	334,6	9,9	270,2	
3	336,1	10,0	272,6	
4	330,8	6,5	269,9	
5	318,8	3,9	269,4	
6	334,3	9,2	271,6	
7	334,1	9,2	272,0	
8	332,0	8,0	269,4	
9	335,6	8,7	273,6	
10	325,8	6,5	269,3	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
2,098962 1,093973 2,294

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	332,9	8,4	271,0
s	5,4	1,9	1,5
v	1,62	24,23	0,56

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	331,5	7,9	270,8
s	5,095	1,812	1,440

odmocnina  
0,9

## Příloha 5 – g

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 3.1.1C

**tavba:** 11871  
**datum liti:** 12.1.2012  
**material:** AlSi7Mg0,6  
**poznámka:** 3.1.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	225,8	6,0	134,2	
2	217,2	5,3	132,8	
3	222,6	5,8	133,2	
4	224,3	5,8	133,4	
5	207,7	4,6	130,6	
6	211,3	4,7	133,0	
7	210,5	5,2	132,8	
8	215,7	5,6	133,7	
9	210,9	5,2	129,6	
10	228,7	6,3	136,3	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
1,544745 1,544745 2,294

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	217,5	5,4	133,0
s	7,4	0,6	1,9
v	3,41	10,13	1,40

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	217,5	5,5	133,0
s	7,049	0,522	1,744

odmocnina  
0,9

## Příloha 5 – h

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 3.2.1C

tavba: 11871  
datum liti: 12.1.2012  
material: AlSi7Mg0,6  
poznámka: 3.2.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]	
1	338,1	8,9	271,2	
2	330,2	5,6	271,4	
3	336,4	10,2	267,6	
4	333,8	6,4	270,4	
5	335,7	8,3	269,8	
6	336,6	6,7	274,4	
7	325,2	3,9	273,6	
8	329,8	6,5	266,5	
9	331,8	6,0	270,8	
10	327,9	5,6	266,9	

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
1,583118 1,84425 2,294

Hodnoty jsou pod kritickou hodnotou na hladině významnosti Alfa-0,05, proto nulovou hypotézu nezamítáme. A můžeme počítat se všemi hodnotami.

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	332,6	6,8	270,3
s	4,3	1,8	2,7
v	1,28	26,64	0,99

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	332,6	6,8	270,3
s	4,035	1,744	2,520

odmocnina  
0,9



## Příloha 5 – i

### Mechanické vlastnosti tyčinky c. 3.3.1C

**tavba:** 11871  
**datum liti:** 12.1.2012  
**material:** AlSi7Mg0,6  
**poznámka:** 3.3.1C

#### Výsledky zkoušek:

Number	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
1	339,6	10,4	270,9
2	341,1	9,9	273,8
3	334,3	10,4	267,0
4	340,7	10,0	273,4
5	335,0	9,5	267,8
6	337,1	11,0	269,2
7	330,6	5,7	268,3
8	336,7	10,0	268,2
9	336,9	9,4	267,8
10	335,2	7,8	267,3

#### Statistika:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	336,7	9,4	269,4
s	3,2	1,5	2,5
v	0,95	16,42	0,92

#### Grubssův test:

n=10	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	336,7	9,4	269,4
s	3,034	1,476	2,358

odmocnina  
0,9

n=9	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	337,4	9,8	269,5
s	2,368	0,850	2,456

odmocnina  
0,888888889

n=8	Rm [MPa]	A5 [%]	Rp0,2 [MPa]
$\bar{x}$	337,7	10,1	269,8
s	2,372	0,487	2,473

odmocnina  
0,875

#### Výpočty Grubssův test:

GA5min GA5max Gkrit n=10  
2,384386 1,02188 2,294

GA5min GA5max Gkrit n=9  
2,244222 1,307074 2,237

GA5min GA5max Gkrit n=8  
1,297323 1,777813 2,172

GA5min je větší než Gkrit,  
proto tuto hodnotu vyřadíme.

GA5min je větší než Gkrit,  
proto tuto hodnotu vyřadíme.

Hodnoty jsou pod kritickou  
hodnotou na hladině  
významnosti Alfa-0,05, proto  
nulovou hypotézu  
nezamítáme. A můžeme  
počítat se všemi hodnotami.