



Charakteristika metody squeeze casting pro výrobu odlitků

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Vladislav Obychod**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladislav Obychod**
Osobní číslo: **S15000138**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Charakteristika metody squeeze casting pro výrobu odlitků**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s poměrně novou progresivní technologií výroby kompaktních odlitků, metodou squeeze casting.
2. Prostudujte zákonitosti tuhnutí odlitků v souvislosti se specifiky, které přináší metoda squeeze casting.
3. Zaměřte se na slévárenské slitiny, které lze zpracovávat metodou squeeze casting. Proveďte metalografické hodnocení odlitků a stanovte tvrdost odlitků, které byly vyrobeny metodou squeeze casting a jsou k dispozici na naší katedře.
4. Na základě získaných výsledků formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

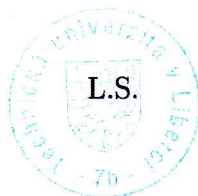
- [1] VINARCIK, J. Edward. *High Integrity Die Casting Process*. Printed by John Wiley. New Your 2003. ISBN 978-0-471-20131-1.
[2] RAGAN, Emil et. al. *Liatie kovov pod tlakom*. 1.vyd. Prešov. ISBN 978-80-8073-979-9.
[3] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných kovů*. PC-DIR, s.r.o Brno. 1998.
[4] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání 1. díl - Teoretické základy technologických procesů*. TU v Liberci 2007, ISBN 80-7372-149-X.
[5] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání 2. díl. - Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin*. TU v Liberci 2007, ISBN 978-80-7372-185-5.
[6] VETIŠKA, Aleš a kol. *Teoretické základy slévárenské technologie*. 1. vyd. SNTL Praha 1974.
[7] Články z odborných časopisů.

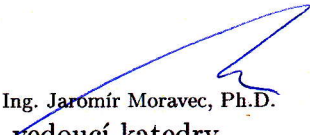
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. února 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 27. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 4.7 2018

Podpis:



Anotace:

Tato bakalářská práce je zaměřena na sledování procesu krystalizace lití pod tlakem (squeeze casting). V teoretické části práce je popsána metoda odlévání s krystalizací pod tlakem a vliv působení tlaku na krystalizaci. Též je uvedena charakteristika zařízení a slévárenské formy i používaných slitin hliníku. Experimentální část se zabývá sledováním mikrostruktury, hodnoty DAS a tvrdosti odlitků ze slitiny hliníku vyrobených metodou squeeze casting. K tomuto účelu byly odlévané odlitky tvaru komolého kužele. Během krystalizace na taveninu působila pro jednotlivé experimenty tlaková síla 700 000 N, 1000000 N a 2000000 N. Měření tvrdosti odlitků bylo prováděno metodou podle Brinella. Získané hodnoty DAS a tvrdosti byly statisticky vyhodnoceny.

Klíčová slova:

odlívání s krystalizací pod tlakem, odlitek, slitina hliníku AlSi 12, mikrostruktura, tvrdost odlitku.

Annotation:

This bachelor thesis is focused on monitoring the squeeze casting proces (crystallisation under pressure). The theoretical part of the thesis describes the squeeze casting method and the effect of pressure on crystallization. Also, the characteristics of the equipment and foundry moulds and aluminium alloys used are also given. The experimental part deals with microstructure monitoring, DAS values and hardness of aluminium alloy castings produced by squeeze casting. For this purpose were cast a frustrum of cones shape. During crystallization of the melt were pressure forces: 700,000 N, 1000000 N and 2000000 N were applied for individual experiments. The measurement hardness casting was performed according to the Brinell method. The DAS and hardness values obtained were statistically evaluated.

Keywords:

squeeze casting, aluminium alloy AlSi 12, casting, microstructure, hardness of casting.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady, ochotu a trpělivost při zpracování tohoto tématu. Moje poděkování dále patří celé rodině a mému okolí za podporu během celého studia.

OBSAH

1.	ÚVOD	8
2.	TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	9
2.1	Charakteristika krystalizace pod tlakem	9
2.1.1	Obecné závislosti krystalizace	10
2.2	Charakteristika krystalizace pod tlakem	13
2.3	Technologie squeeze casting	18
2.3.1	Přímá metoda lití s krystalizací pod tlakem	19
2.3.2	Nepřímá metoda lití s krystalizací pod tlakem	20
2.3.3	Metoda lití s krystalizací pod tlakem s vynuceným prouděním	20
2.4	Formy a stoje pro metodu squeeze casting	21
2.4.1	Materiály forem pro metodu squeeze casting	21
2.4.2	Konstrukce forem pro metodu squeeze casting	22
2.4.3	Stroje pro odlévání metodu squeeze casting	24
2.5	Slévárenské slitiny hliníku	27
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	29
3.1	Charakteristika použitého zařízení	30
3.1.1	Charakteristika pracovního nástroje	30
3.2	Charakteristika použité slévárenské slitiny	31
3.3	Metodika a provádění experimentů	33
3.3.1	Stanovení staženin hliníku	34
3.3.2	Výpočet tlaku v dutině formy.....	35
3.4	Hodnocení struktury hliníkových odlitků	36
3.4.1	Shrnutí výsledků metalografického pozorování a naměřených výsledků DAS.....	43
3.5	Hodnocení tvrdosti vzorků	44
3.5.1	Shrnutí výsledků tvrdosti	46
4.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	48
5.	ZÁVĚR	50
6.	SEZNAM LITERATURY	52

1. ÚVOD

Slévárenství je výrobní odvětví, které má dlouholetou tradici (3 až 4. tisíce let př. n. l.) . V současnosti se slévárenství zaměřuje na metody a postupy, které vedou k úspoře materiálu a energie. Vytváří odlitky s vysokou užitnou hodnotou. K těmto metodám se řadí „Metoda s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting“. Touto metodou se vyrábí konstrukční díly, které se vyznačují velkou hutností materiálu. Tyto díly také neobsahují nepotřebnou strukturní poretitu.

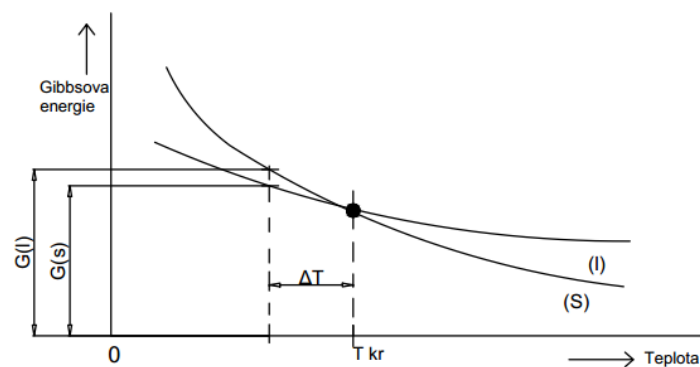
Proces odlévání touto metodou spočívá v klidném plnění dutiny formy, po kterém následuje krystalizace a ztuhnutí odlitku za soustavného působení tlaku. V Indii se touto metodou vyrábí odlitky o hmotnost až 150 kg. Tyto odlitky můžeme vyrábět z čistých kovů i z jejich slitin.

Výrobou odlitků metodu „Squeeze Casting“ se v současné době zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie – Fakulty strojní TU v Liberci, v rámci řešení výzkumného projektu TAČR. S tímto závěrem je spojeno i řešení mé bakalářské práce, které je na téma: „Lití s krystalizací pod tlakem“.

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

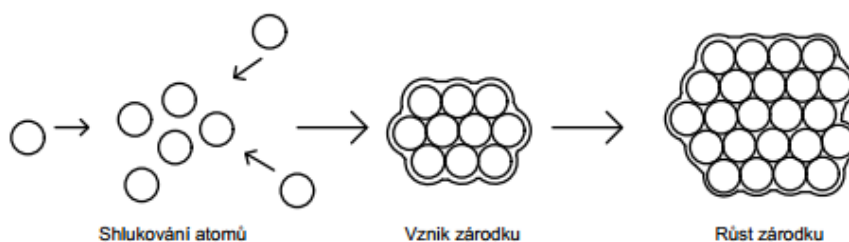
2.1 Charakteristika krystalizace kovů

Krystalizace je přechod kapalné fáze do tuhé fáze za vzniku krystalické struktury. Krystalizací rozumíme tvorbu krystalizačních zárodků a následně růst těchto zárodků (růst krystalitů). Příčinou tohoto děje je snaha taveniny kovu dosáhnout při změně vnějších podmínek (v tomto případě změny teploty) stabilního stavu - tj. minimální hodnotu změny Gibbsovy energie ΔG , která daný děj charakterizuje. Na obr. 2-1 je uvedeno schéma průběhu Gibbsovy energie kapalné a tuhé fáze v závislosti na teplotě. Z obr. 2-1 je zřejmé, že stabilnější je ta fáze, která má při určité teplotě nižší hodnotu Gibbsovy energie. Protože daný děj může probíhat jen tehdy, když změna Gibbsovy energie je záporná, nebo Gibbsova energie klesá. Pak z obrázku je také zřejmé, že pro průběh krystalizace, resp. pro splnění $\Delta G = G(s) - G(l) < 0$, je nutné tzv. podchlazení taveniny. To značí, že krystalizace taveniny nezačíná při teplotě krystalizace T_{KR} , ale při teplotě nižší. Přechlazení je nutné také proto, aby byla zajištěna dynamika krystalizačního pochodu proti uvolňujícímu se latentnímu teplu krystalizace.



Obr. 2-1 Závislost Gibbsovy energie tuhé a kapalné fáze na teplotě [2]

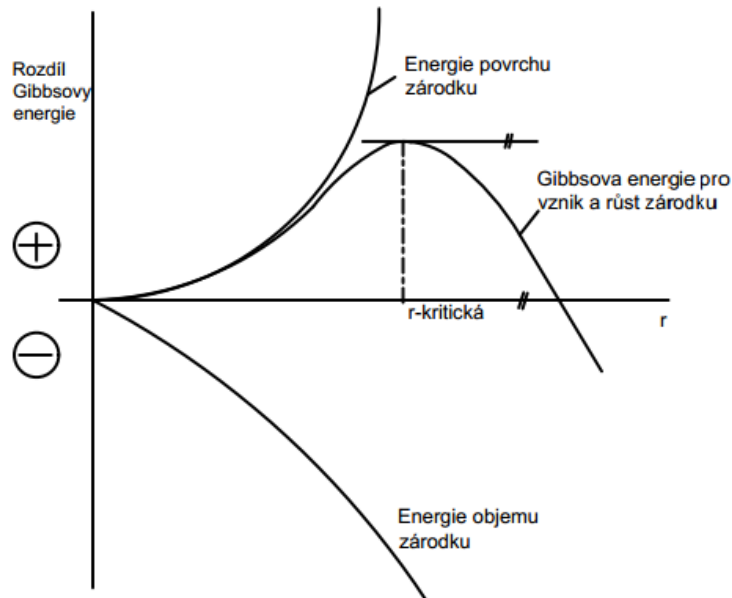
Na obr. 2-2 schéma shlukování atomů za vzniku krystalizačních zárodků.



Obr. 2-2 Schéma vzniku krystalizačních zárodků v taveninách kovů [2]

2.1.1 Obecné závislosti krystalizace

Mechanismus krystalizace závisí na strukturování atomů kovů, díky shluku těchto atomů vznikají krystalizační zárodky, po přidání shluku dalších atomů krystalizační zárodky rostou.



Obr. 2-3 Závislost Gibbsovy energie na velikosti zárodků [2]

Krystalizace kovů a jejich slitin je difúzní fázová přeměna, která se skládá z dvou stádií: tvorby zárodků a růstu zárodků. Krystalizační zárodky vznikají nukleací. Rozlišujeme homogenní a heterogenní nukleaci. Homogenní nukleace vzniká lokálním podchlazením taveniny bez přítomnosti cizí částice. Heterogenní nukleace vzniká podchlazením taveniny v důsledku přítomnosti cizí částice v tavenině. V praxi se uplatňuje především heterogenní nukleace, nejen v důsledku přítomnosti cizí částice, což může být úlomek pecní vyzdívky nebo kelímku. Nebo záměrným přidáváním částic do taveniny, což je v podstatě očkování nebo modifikace taveniny.

Homogenní (samovolná) nukleace - v tavenině může dojít k místnímu kolísání teploty (tzv. fluktuaci teploty), které vede k místnímu podchlazení taveniny a tím i k přechodu tekuté fáze ve fázi tuhou s pravidelným uspořádáním atomů. Práce potřebná k vytváření zárodků tuhé fáze ve fázi kapalné je úměrná změně Gibbsovy energie ΔG_z [2].

$$\Delta G_z = V_z \cdot \Delta G_v + S_z \cdot \sigma [J], \quad (1)$$

kde značí: ΔG_v - změnu Gibbsovy energie pro objem zárodku [$J \cdot m^{-3}$]; V_z - objem zárodku [m^3]; S_z - povrch zárodku [m^2]; σ - povrchové napětí zárodku [$N \cdot m^{-1}$].

Pro krystalizaci je také důležitá kritická velikost zárodku r_{KRIT} , viz obr. 2-3. Z tohoto obrázku je zřejmé, že r_{KRIT} odpovídá extrému na křivce - první derivace je rovna 0, tj. tečna je rovnoběžná s osou x; $d\Delta G_z/dr = 0 \rightarrow r_{KRIT}$.

$$r_{KRIT} = \frac{(2M \cdot T_{KR} \cdot \sigma_{z-t})}{(L_{KR} \cdot \rho \cdot \Delta T)}, \quad (2)$$

kde značí: M - molekulovou hmotnost krystalizující látky; T_{KR} - teplotu krystalizace; ρ - hustotu krystalizující látky; L_{KR} - latentní krystalizační teplo; ΔT - podchlazení; σ_{z-t} - mezifázové napětí mezi zárodkem a taveninou; k - konstantu (zahrnující vliv M ; T_{KR} , L_{KR} , ρ , ΔT).

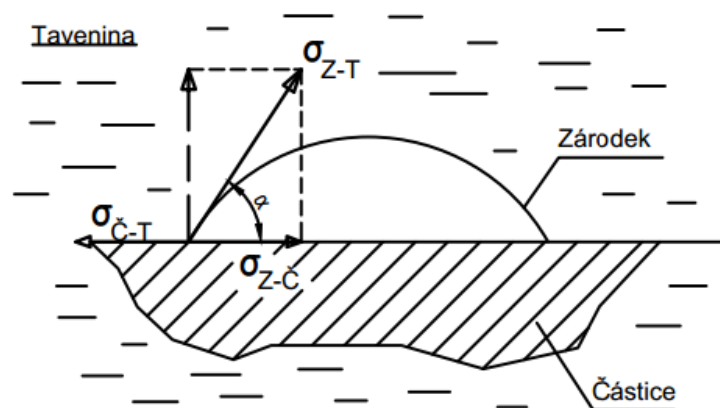
Kritická velikost zárodku závisí hlavně na podchlazení a povrchovém napětí mezi zárodkem a taveninou. Vždy chceme r_{KRIT} co nejmenší, neboť jemnozrnější struktura kovu vykazuje větší mechanické hodnoty. Vyžadujeme poměrně malé povrchové napětí a naopak velké podchlazení. Hodnotu podchlazení ovlivňuje typ slévárenské formy. Např. kovové formy vykazují velké přechlazení, naopak sádrové formy malé podchlazení. To znamená, že po odlití do kovové formy bude drobnozrnější struktura odlitku, neboť ochlazování je rychlé a krystaly nestačí vyrůst. Naopak po odlití do sádrové formy odlitek vykazuje hrubozrnější strukturu. Sádrová forma odvádí z taveniny teplo pomalu a krystaly stačí vyrůst velké.

Hodnota podchlazení je u homogenní nukleace cca $0,2T_{KR}$. Homogenní nukleace se v praxi téměř nevyskytuje.

Heterogenní nukleace - v praxi se objevuje tento typ vzniku zárodků. Tavenina není nikdy ideálně čistá, jak se předpokládá u homogenní nukleace. Vždy tavenina obsahuje cizí částice, ať již zbytky strusky, úlomky pecní vyzdívky, oxidy, křemičitany, ale též někdy úmyslně přidáváme očkovadla a modifikátory. Tyto částice usnadňují krystalizaci, neboť při heterogenní nukleaci stačí podchlazení $0,02T_{KR}$. Na obr. 2-4 je uvedeno schéma zárodka tvořícího se na cizí částici. Kritickou velikost zárodka stanovíme podobně jako u homogenní nukleace.

$$(r_{KRIT})_{HET} = (r_{KRIT})_{HOM} \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

kde značí: α - úhel smáčení cizí částice taveninou.



Obr. 2-4 Schéma růstu krystalizačního zárodka na cizí částici [2]

Požadavky na částici, aby mohla splňovat funkci krystalizačního zárodka, jsou:

- a) teplota tavení částice musí být větší než teplota tavení odlévaného kovu;
- b) musí mít příbuznou krystalickou mřížku;
- c) částice musí být co nejvíce smáčivá;
- d) částice a tavenina musí mít pokud možno stejnou hustotu.

V praxi se vyžaduje, aby r_{KRIT} bylo co nejmenší, což lze splnit těmito kritérii:

1. velkým podchlazením taveniny (ΔT), tj. volit formu s velkou hodnotou tepelné akumulace b_F ;
2. očkovat taveninu;
3. mechanicky ovlivňovat krystalizaci, např. zvýšeným tlakem, vibracemi formy.

2.2 Charakteristika krystalizace kovů pod tlakem

Tekutý kov (jakákoliv kapalina), je v pravém slova smyslu téměř nestlačitelný. Avšak jiná situace nastává při působení tlaku na tuhnoucí taveninu kovů. Vliv tlaku je pro krystalizaci kovů prospěšný – vzniká zhutněná struktura kovu bez vnitřních vad. Proto, když hovoříme o procesu squeeze casting (krystalizace kovů pod tlakem), máme na mysli, že konečné tvarování kovových částí se uskutečňuje v procesu krystalizace. Proces squeeze casting má proti krystalizaci při vysokotlakém lití tyto výhody:

1. Tavenina kovů může vyplňovat dutinu formy za nižších tlaků a rychlostí.
2. Obecně při lití do slévárenské formy je obtížné předcházet turbulencím taveniny, při vysokotlakém lití naopak vzniká disperzní plnění dutiny formy (vzduch je obklopen taveninou).
3. Při odlití taveniny do formy v procesu squeeze casting nevzniká turbulence taveniny, čímž nevznikají žádné podmínky pro zadržování vzduchu a plynů v tavenině. To je způsobeno tím, že se tavenina nalévá do otevřené formy, čímž se vynáší objem vzduchu rovný plnému objemu nalitého kovu, resp. odlité taveniny.

Vliv tlaku do popisu krystalizace je možno zahrnout prostřednictvím matematického vyjádření izotermicko-izobarického potenciálu, podle BATYŠEVA [3], tzv. diferenciálu Gibbsovy energie:

$$dG = S \cdot dT + V \cdot dp \quad (4)$$

kde značí: **S** - entropii [J.K⁻¹]; **dT** - přírůstek teploty [K]; **V** - objem [m³]; **dp** - diferenciál tlaku [Pa].

Pro konstantní teplotu $T = \text{konst.}$, $dT = 0$, pak rovnice (4) přechází v rovnici:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = V \quad (4)$$

Při konstantní teplotě se volná energie (Gibbova energie, je část energie, která může být ze soustavy uvolněna, může konat práci při podmínkách $T = \text{konst.}, P = \text{konst.}$) zvyšuje zvýšeným tlakem v relaci s objemem. Rovnice vede k tomu, že zvýšení tlaku by mohlo podporovat tvorbu nové fáze s menším molárním objemem. Pro krystalizaci pod tlakem je velmi důležitá změna aktivační energie U v závislosti na tlaku. Podle BATYŠEVA [3] je možno tuto energii vyjádřit vztahem:

$$U = U_0 (1 + \beta \cdot p) \quad (5)$$

kde značí: U_0 - aktivační energii při atmosférickém tlaku [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]; β – součinitel vlivu tlaku.

Vliv tlaku na počet krystalizačních zárodků řešil také BATYŠEV [3]. Svým výzkumem podpořil předpoklad, že s rostoucím tlakem, který působí na taveninu roste i počet krystalizačních zárodků. Nejefektivnější účinek tlaku se projevuje při fázové přeměně, tj. v tomto případě tavenina \rightarrow tuhá fáze. Při fázové přeměně, resp. při krystalizaci i při krystalizaci pod tlakem je změna objemu. Podle FRENKELA [1], na základě teorie děr a za předpokladu, že změna objemu taveniny pod tlakem je spojená s odstraněním „volného“ objemu v důsledku eliminace děr, popisuje BORISOV [18] závislost mezi velikostí tlaku a změnou objemu:

$$V - V_p = N \cdot V_d \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_d}{R \cdot T}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{p \cdot V_d}{k \cdot T}\right)\right] \quad (6)$$

kde značí: V – počáteční objem taveniny kovu (s dírami) [m^3]; V_p – objem při působení tlaku [m^3]; V_d - objem jedné díry [m^3]; N - počet atomů v tavenině kovu; ΔG_d - změnu Gibbsovy energie potřebné na vznik jedné díry [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$].

Popisovaná matematická souvislost tlaku a objemu vyjadřuje skutečnost, že působením tlaku na eliminaci děr v děrové teorii tavenin kovů, je možno zmenšit celkový objem při určité teplotě do takové míry, že proběhne fázová přeměna. Při lití pod tlakem proběhne krystalizace, resp. tuhnutí kovů. Tuhnutí a tání kovů se řadí do fázových přechodů prvního druhu. Implicitní funkce těchto fázových přechodů je:

$$f(p, T) = 0, \quad (7)$$

kde značí: p - tlak soustavy [Pa]; T - teplotu soustavy [K].

Protože jde o nezávisle proměnné, pak lze vyjít z podmínky Gibbsovy energie, resp. pro rovnovážné podmínky $dG = 0$ ($\Delta G = 0$), Gibbsova energie je definována vztahem: $G = H - T \cdot s$, pro diferenciální tvar rovnice platí: $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta s = 0$. Z této podmínky získáme: $\Delta H = T \cdot \Delta s$, což není nic jiného, než teplo fázového přechodu při konstantním tlaku. Tuto podmínku v termodynamice fázových přechodů, jako je např. tuhnutí a tání kovů popisuje Clapeyronova (Clausius Clapeyronova) rovnice [2]:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T \cdot (V_L - V_S)}{\Delta H_{(L,S)}}, \quad (8)$$

kde značí: T - teplotu tání fázového systému, pro hliník $660 + 273 = 933$ [K]; V_L - molární objem v tekutém stavu [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$], molární objem hliníku v kapalném stavu je $10,7 \cdot 10^{-6}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$]; V_S - molární objem v tuhém stavu [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$], molární objem hliníku v tuhém stavu je $10,0 \cdot 10^{-6}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$]; $\Delta H_{(L,S)}$ - molární teplo fázového přechodu (krystalizace nebo tavení) [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$], pro hliník je $10\,460$ [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]; dT/dp - diferenciální kvocient fázového přechodu.

Uplatnění Clapeyronova (Clausius Clapeyronova) rovnice (8) pro výpočet je závislý na znalosti příslušných fyzikálních veličin ($\Delta H_{(L,S)}$, V_L , V_S , T). *Molární objem* je také známý jako atomový objem, standardní jednotky SI jsou $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$. Stanovení molárního (molového) objemu pro kapalný hliník a pro tuhý hliník a také analogicky pro křemík, lze určit podle rovnice:

$$V_L = \frac{\text{relativní atomová hmotnost hliníku}}{\text{hustota hliníku v kapalném stavu (při teplotě tavení)}} \quad (9)$$

$$V_S = \frac{\text{relativní atomová hmotnost hliníku}}{\text{hustota hliníku v tuhém stavu (při teplotě 20°C)}} \quad (10)$$

Relativní atomová hmotnost hliníku je 26,98. Hustota hliníku pro tuhý stav (20°C) je 2700 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], tj. $2,700$ [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], a pro kapalný stav (660 °C) je 2480 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], tj. $2,480$ [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], někteří autoři uvádějí hustotu 2380 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], Molární teplo tavení hliníku $\Delta H_{\text{tání}}$ je $10\,684$ [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$], dle jiné literatury $10\,460$ [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$], atd. Skupenské teplo tání hliníku je $396\,100$ [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

U skutečných fázových přechodů prvního druhu se mění entalpie i objem a to tak, že se zvětšujícím objemem vzrůstá i entropie a to znamená, že $\Delta H_{(L,S)} > 0$ a pak i $\Delta V_{(L,S)} > 0$, resp. $V_L - V_S > 0$ a také diferenciální kvocient $dT/dp > 0$. Současně většina kovů splňuje podmínku $V_L > V_S$, tj. že objem taveniny je větší než objem ztuhlého kovu, to také čistý hliník splňuje. U těchto kovů teplota přechodu (např. T_{TA} , resp. T_{KR}) s rostoucím tlakem vzrůstá. Tak např. zvýšením tlaku o $\Delta p = 0,1 \text{ MPa}$ (101325 Pa) se zvýší teplota tání čistého olova o hodnotu $\Delta T = 0,008 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota tání zinku o hodnotu $\Delta T = 0,006 \text{ }^\circ\text{C}$.

U některých kovů, jako je např. křemík, galium, bizmut, antimon, je objem jejich taveniny menší, než objem v tuhém stavu $V_L < V_S$. V těchto případech se teplota tání s rostoucím tlakem snižuje.

Vliv tlaku v procesu krystalizace a tuhnutí je nutno sledovat v souvislosti s teplotou. Rozborem tohoto procesu se zabýval BATYŠEV [3] a dospěl k závěru, že při krystalizaci pod tlakem vzniká tzv. atermické podchlazení. Atermické podchlazení přispívá ke krystalizačnímu procesu taveniny. Na obr. 2-5 je schematicky uvedeno, že s rostoucím tlakem se teplota likvidu i solidu kovu zvětšuje. Nad křivkou likvidu je oblast *taveniny*, značeno **1**. Mezi křivkou likvidu a solidu, je oblast taveniny a krystalů, tj. oblast označená **2**. Zde jsou stejné rozdíly teplot ΔT v porovnání k různým tlakům. Pod křivkou solidu se nachází oblast **3.**, *tuhá fáze*.

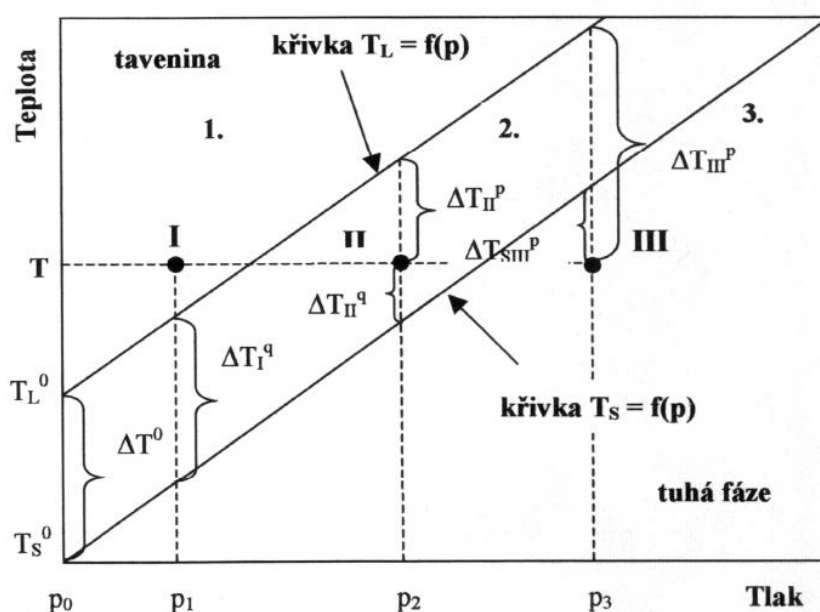
Z obr. 3 jsou patrné tři základní oblasti:

- 1. oblast** - stabilního tekutého stavu;
- 2. oblast** - metastabilního tekutého stavu (pod T_L^P);
- 3. oblast** - metastabilního tuhého stavu (přehřátého stavu nad T_S^0).

V případě výskytu kovové soustavy v **oblasti 1.**, proces krystalizace se může uskutečňovat jen v důsledku snížené teploty taveniny pouze způsobem intenzivního ochlazování. Hodnota podchlazení $\Delta T^0 = \Delta T_I^q$.

V oblasti výskytu kovové soustavy v **oblasti 2.**, metastabilního stavu, je hodnota podchlazení ΔT^0 , které vzniká v důsledku působení tlaku ΔT_{II}^P na zabezpečení procesu krystalizace též nedostatečné. Rozhodujícím faktorem je v tomto případě dostatečné podchlazení ΔT_{II}^q . Proces krystalizace v celém rozsahu podchlazení je $\Delta T^0 = \Delta T_{II}^P + \Delta T_{II}^q$.

V případě výskytu kovové soustavy v **oblasti 3.**, se proces krystalizace zabezpečuje v celém rozsahu podchlazení v důsledku působení tlaku. Hodnota podchlazení $\Delta T^0 = \Delta T_{III}^P$. Výsledná hodnota podchlazení ΔT_L^P převyšuje hodnotu ΔT^0 , tím více, čím více je tavenina v okamžiku působení tlaku podchlazená (při $T \rightarrow T_S^0$; $T_S^0 \rightarrow T_S^P$). Lze psát: $\Delta T^P = \Delta T^0 + \Delta T_S^0$. Z této rovnice vyplývá, že intenzita odvodu tepla z krystalizující taveniny je určující v procesu krystalizace v tomto případě, když $\Delta T^0 \geq \Delta T_S^P$. V případě, že v procesu krystalizace sehrává vedoucí úlohu tlak působící na taveninu, když $T_S^P > T^0$.



Obr. 2-5 Vliv tlaku a teploty na vznik atermického podchlazení [3]

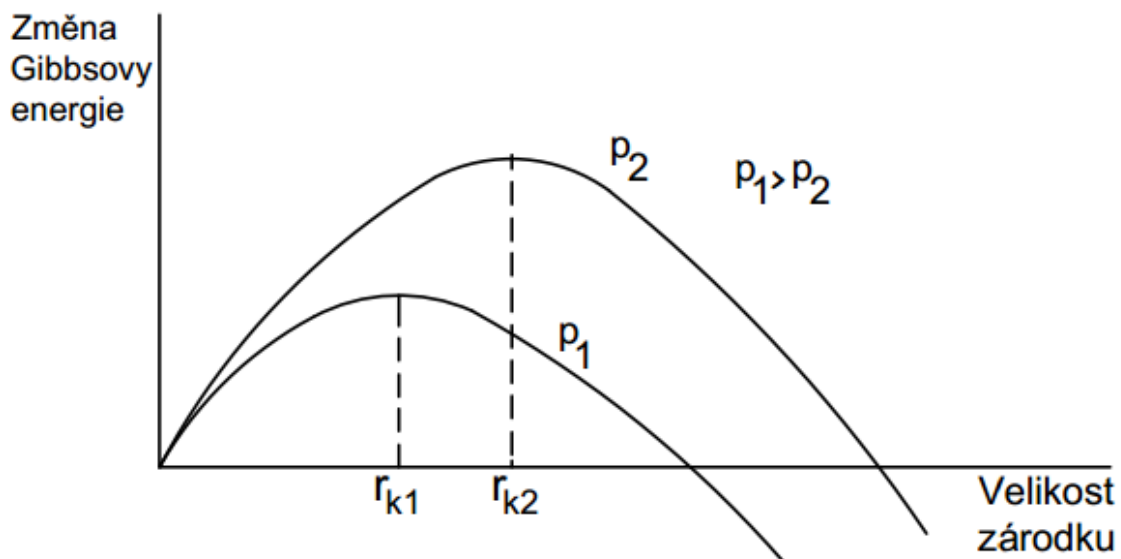
Pro výpočet kritické velikosti zárodků r_{KR} v důsledku působení tlaku, podle [3] je možno psát:

$$r_{KR} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M (T_L^0 + T_L^P)}{L \cdot \rho \cdot (\Delta T^0 + \Delta T_S^P)} \quad (11)$$

kde značí: r_{KR} - kritický rozměr krystalizačního zárodku [m]; M - molární hmotnost [kg·mol⁻¹]; ρ - hustotu [kg·m⁻³]; L - latentní krystalizační teplo [J·kg⁻¹]; σ - povrchové napětí [N·m⁻¹]; T_L^0 - teplotu likvidu slitiny [°C, K] při tlaku 101325 Pa; ΔT^0 - podchlazení vlivem působícího tlaku [°C, K]; ΔT_L^P - změnu teploty likvidu slitiny

při působení zvýšeného tlaku [$^{\circ}\text{C}, \text{K}$]; ΔT_S^P - změnu teploty solidu slitiny při působení zvýšeného tlaku [$^{\circ}\text{C}, \text{K}$].

Hodnota tlaku ovlivňuje kritickou velikost krystalizačních zárodků, viz obr. 2-6. Jak je z obrázku zřejmé, čím je vyšší tlak působící na taveninu při její krystalizaci, tím pro průběh krystalizace jsou dostačující menší krystalizační zárodky, které tepelná energie taveniny nerozpustí.



r_{k1} – kritická velikost zárodů při vyšším tlaku; r_{k2} – kritická velikost zárodů při nižším tlaku;

Obr. 2-6 Vliv tlaku na termodynamické poměry - změnu Gibbsovy energie [2]

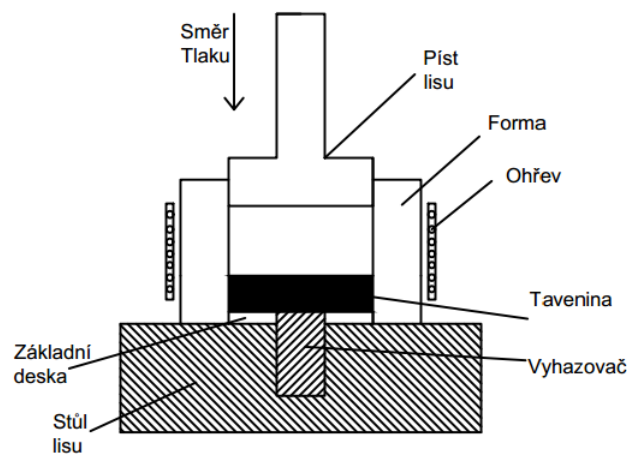
2.3 Technologie odlévání s krystalizací pod tlakem (squeeze casting)

Odlévání s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) je technologie lití kovů, která se používá pro výrobu odlitků z neželezných kovů, nejčastěji ze slitin hliníku. Je to jiná technologie, než je dnes známá a rozšířená technologie vysokotlakého nebo nízkotlakého lití odlitků. Technologie odlévání s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) se používá pro výrobu odlitků s velmi kompaktní jemnozrnnou strukturou, kvalitním povrchem a vysokou rozměrovou přesností. Tato charakteristika struktury odlitků vede k jejich zvýšeným mechanickým i užitným vlastnostem. Lze vyrábět odlitky s různou hmotností od 0,05 do cca 150 kg.

Technologie lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) aplikuje *přímé, nepřímé* silové působení „lisovníku“ na taveninu nebo tzv. *vynucené proudění*. Metoda vynuceného proudění umožňuje vyrábět „stromeček“ s více odlitky.

2.3.1 Přímá metoda lití s krystalizací pod tlakem [1]

Přímá metoda (direct squeeze casting) je přímé silové působení „lisovníku“ na taveninu, ve speciálně konstruované dutině otevřené slévárenské formy je na obr. viz obr. 2-7.



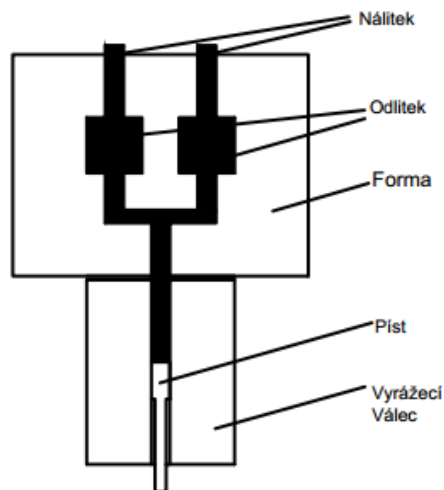
Obr. 2-7 Schéma metody Squeeze casting (odlévání s krystalizací pod tlakem, přímá metoda) [1]

Tím se technologie lití s krystalizací pod tlakem liší od klasické metody vysokotlakého lití. Technologie vysokotlakého lití je založena na nalití taveniny do komory vysokotlakového stroje, s následným vtlačení taveniny prostřednictvím pistu pracovního stroje do dutiny vysokotlaké formy. Vtlačení taveniny do slévárenské formy je provedeno přes vtokovou soustavu, tj. zářez (naříznutí). Rychlost proudění v zářezu může být až $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přítomnost vzduchu v tlakové komoře tlakového stroje a vysoká rychlost pracovního pistu přispívá ke vzniku turbulentního, resp. disperzního proudění taveniny v zářezu vtokové soustavy. Disperzní charakter proudění způsobuje poróznost odlitků. Doba tuhnutí vysokotlakého odlitku je limitována tuhnutím taveniny v tenkém zářezu je velmi krátká, řádově to jsou milisekundy, v důsledku čehož tuhne prakticky odlitek téměř bez působení tlaku (dotlaku). Hodnoty tlaku (dotlaku) se při se při vysokotlakém lití nad 100 MPa používají jen mimořádně (nepřispívají ke kvalitě odlitku a ničí se vysokotlaké stroje i formy). Ke

snížení porózy odlitků se dnes používá vakuování dutiny vysokotlaké formy. Opatření v použití vakuování dutiny formy, však neodstraňuje turbulentní až disperzní plnění její dutiny. Nedostatky výroby odlitků klasickým vysokotlakým litím odstraňuje nebo alespoň výrazně eliminuje metoda lití s krystalizací pod tlakem. Využívá laminární proudění taveniny gravitačním litím do kovové formy a její následné lisování. Při lisování taveniny ve formě působí tlak na taveninu po celou dobu jejího tuhnutí. Působením tlaku v průběhu tuhnutí dochází k výrazné eliminaci vnitřních vad odlitků. Pro výrobu odlitků s krystalizací pod tlakem se používají nejčastěji hydraulické tvářecí lisy nebo speciálně upravené vysokotlaké licí stroje a speciálně konstruované slévárenské formy, jsou především pro nepřímou metodu s krystalizací pod tlakem (indirect squeeze casting).

2.3.2 Nepřímá metoda lití s krystalizací pod tlakem [1]

Nepřímá metoda (indirect Squeeze casting), viz obr. 2-8 je velmi podobná konvenčnímu tlakovému lití se studenou komorou. Typickým znakem této metody jsou bohatě dimenzované zářezy, díky kterým může tavenina lépe plnit formu. Tlaky se pohybují od 55-300 MPa. Na rozdíl od přímé metody nepoužíváme při této metodě vyrovnání teplot, díky tomu tavenina chladne rychleji. To se projevuje zmenšením dendritických zrn v celém objemu taveniny.



Na obr. 2-8 Schéma nepřímé metody squeeze casting [1]

2.3.3 Metoda lití s krystalizací pod tlakem s vynuceným prouděním [1]

Je speciální kombinace nepřímé metody s vyšším počtem vtokových kanálů, které se uplatňují pro výrobu více odlitků ve „stromečku“. Hlavní odlišnost je v konstrukci

vtokové soustavy, která i při vysokých tlakových poměrech musí zabezpečit laminární proudění taveniny do dutiny slévárenské formy.

Technologické zákonitosti při aplikaci metody squeeze casting jsou:

- 1) Teploty lití slitin hliníku jsou v porovnání s jinými technologiemi odlévání nižší. K tomu přispívá nepotřebnost vtokové soustavy a účinek tlaku při krystalizaci umožňuje použití nižší teploty. Např. podle FRANKLINA [1] se technologie lití s krystalizací pod tlakem používá pro slitiny typu Al-Si, zde je možno podle chemického složení konkrétní slitiny použít přehřátí taveniny 20 až 100 °C. Počáteční teplota formy by neměla překročit 300 °C.
- 2) Hodnota lisovacího tlaku závisí na druhu slitiny, konstrukci a tvaru odlitku, resp. dutiny slévárenské formy. Maximální hodnota lisovacího tlaku podle autorů FRANKLINA [1], a SUZUKIHO [5] nemá překročit tlak 100 MPa a minimální hodnota tlaku nemá překročit 70 MPa. Podle FRENKLINA [1] jsou však optimální lisovací tlaky 80 až 150 MPa. Autoři však neuvádí hodnoty tlaků v souvislosti s velikostí a rozměry odlitků.
- 3) Doba působení tlaku na taveninu závisí na konstrukci, tloušťce stěny odlitků. Podle BATYŠEVA [3] se doporučuje 1 sekunda na tloušťku 1 mm stěny odlitku. U tenkostěnných odlitků by doba působení tlaku na taveninu měla být cca 3 až 4 sekundy. Při překročení této doby vzniká mimořádný nárůst tuhé fáze v části odlitku, která je ve styku s „razníkem“. Tato tuhá fáze snižuje účinek působení tlaku na taveninu při její krystalizaci.
- 4) Minimální rychlost pohybu lisovacího „razníku“ naprázdno se doporučuje 0,08 m·s⁻¹. Optimální rychlost „lisovníku“ při lisování slitin hliníku je 0,2 až 0,5 m·s⁻¹. Volní mezera mezi formou a „lisovníkem“ se doporučuje 0,15 m·s⁻¹.

2.4 Formy a stoje pro metodu squeeze casting

2.4.1 Materiály forem pro metodu squeeze casting [26]

Při volbě materiálu kovových slévárenských forem je brán ohled na typ namáhání. Při vysokotlakém lití je forma převážně namáhána tepelně a mechanicky. Při odlévání slitin hliníku musíme zohlednit také fyzikálně-chemické namáhání formy. Obecně používáme pro výrobu forem nejčastěji oceli nebo litiny s lupínkovým grafitem.

Vlastnosti ocelové formy zlepšujeme legujícími prvky, například chrom, molybden a vanad. U ocelí které se používají při metodě squeeze casting požadujeme vysokou otěruvzdornost, odolnost proti tepelné únavě a cyklickému tepelnému namáhání, deformaci a erozi při pracovní teplotě formy. Dále potřebujeme dobré mechanické vlastnosti, dobrou tepelnou vodivost, nízkou teplotní roztažnost a rozměrovou stálost.

Pro výrobu vysokotlakých slévárenských forem nejčastěji používáme ušlechtilou ocel ČSN 19552, dnešní značení ČSN EN 1.2343. Materiál je dodáván v naměkko vyžíhaných blocích a konečné zpracování tohoto materiálu spočívá v kalení a následně dvojitým popouštěním.

Chemické složení této oceli: 0,36-0,42 % uhlíku, 0,90-1,20 % křemíku, 0,30-0,50 % manganu, 4,80-5,00 % chromu, 0,25-0,30 % vanadu, 1,10-1,40 % molybdenu.

2.4.2 Konstrukce forem pro metodu squeeze casting [9], [20]

Konstrukce formy pro metodu squeeze casting v některých rysech je shodná s konstrukcí vysokotlakých forem. Formy jsou půlené. Jedna půlka obsahuje vodící kolíky, druhá půlka díry, tak aby byla zabezpečena souosost obou půlek.

Základem pro řešení byly zkušenosti výzkumníka FUJII [9], který prováděl experimenty s krystalizací pod tlakem při odlévání odlitků tvaru válce. Stanovil vztah pro čas tuhnutí odlitku:

$$t_{tuh} = K \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 = K \cdot M^2, \quad (12)$$

kde značí: t_{tuh} - čas tuhnutí odlitku [s]; K - koeficient tuhnutí [$s \cdot cm^{-2}$]; V - objem odlitku [cm^3]; S - plochu odlitku přes kterou přechází teplo do slévárenské formy [cm^2]; M - modul odlitku [cm].

Koeficient pro lití pod tlakem siluminů [9] je 21,1 [$s \cdot cm^{-2}$] a pro srovnání, koeficient tuhnutí pro gravitační lití do kovových forem je 42,1 [$s \cdot cm^{-2}$]. Koeficient pro odlévání metodou squeeze casting podle předpokladů je 25 až 27 [$s \cdot cm^{-2}$].

Pro specifický tvar odlitku a technologické parametry lití je nutno tvar vtokové soustavy v nástroji přizpůsobit na základě výsledků při výrobě konkrétních zkušebních odlitků. Při výrobě některých odlitků se ve slévárenské praxi více používají možnosti nepřímé metody nebo metoda s vynuceným prouděním.

Rychlost proudění taveniny ve vtokovém kanále je dána rychlostí lisovacího pístu [26]:

$$v_P \cdot S_P = v_K \cdot S_K, \quad (13)$$

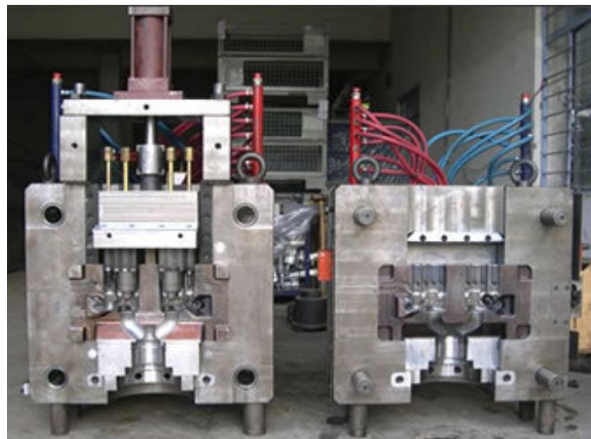
kde značí: v_P – rychlost pracovního pístu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], S_P – plochu pístu [m^2], v_K – rychlost taveniny ve vtokovém kanálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], S_K – plochu vtokového kanálu [m^2].

Plochu průřezu vtokového kanálu ústícího do kovové formy (resp. odlitku) lze vypočítat [26]:

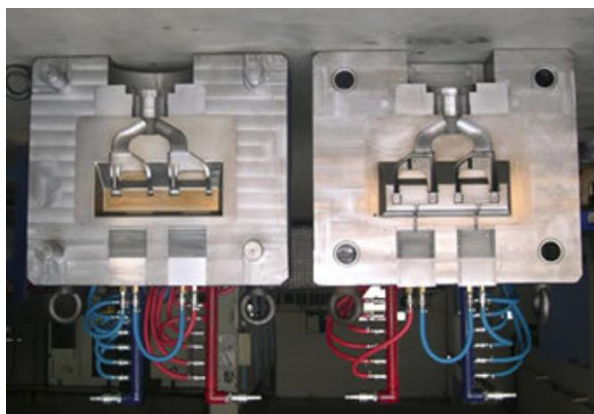
$$S_K = \frac{m_O}{\rho \cdot t_P \cdot v_K}, \quad (14)$$

kde značí: m_O - hmotnost surového odlitku (tj. včetně přetoků, atd.) [g], ρ - hustotu odlévané slitiny [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], t_P – doba plnění dutiny formy taveninou [s], v_K – rychlost taveniny ve vtokovém kanálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Rychlost ve vtokovém kanálu u metody squeeze casting je (4 až 12 $\text{in} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. 0,1 až 0,3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Hustota slitiny hliníku je cca 2600 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Na obr. 2-9 je pohled na obě půlky formy pro odlévání nepřímou metodou squeeze casting.



Obr. 2-9 Forma pro nepřímou metodu squeeze casting (výrobce indická firma ALPHACRAFT PVT. LTD. Coimbatore, Tamil Nadu, India) [20]



Obr. 2-10 Forma pro přímou metodu squeeze casting (výrobce indická firma ALPHACRAFT PVT. LTD. Coimbatore, Tamil Nadu, India) [20]

2.4.3 Stroje pro odlévání metodu squeeze casting [21], [22], [26]

Pro tento účel má tlakový stroj dosti často specifickou konstrukci s vertikálním lisovacím mechanismem (vertikální tlaková komora a tlakový pístem). Současně stroj musí mít zařízení pro regulaci tlakové (lisovací) síly. Vhodné je, když se může síla zvyšovat plynule. Stroje mají hydraulický pohon. Tlaková kapalina musí splňovat bezpečnostní předpisy. Uzavírací mechanismus tlakového stroje v tomto případě je kloubový. Řídicí systém stroje vychází z technických parametrů a proměnnými dynamickými parametry. Důležitou součástí stroje pro squeeze casting je lisovací mechanismus. Tento mechanismus musí dopravit specifickým tlakem v krátkém čase značné množství taveniny do dutiny formy. Specifický tlak p , kterým se kov lisuje do formy je daný velikostí tlakové (lisovací) síly a vnitřního průměru tlakové komory:

$$p = \frac{F_P}{S_P}, \quad (15)$$

kde značí: F_P – tlakovou sílu, který vyvozuje pracovní píst [N]; S_P – plochu pístu (plochu tlakové komory) [mm²].

Za předpokladu, že maximální lisovací síla je 650 kN a průměr tlakové komory je 80 mm, pak specifický tlak působící na taveninu je cca 130 MPa. Tlakovou sílu lze vypočítat:

$$F_P = S_P \cdot p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p, \quad (16)$$

kde značí: p – specifický tlak [MPa], D – tlakové komory (průměr pístu) [mm].

Maximální tlak p_{MAX} vyvozený lisovníkem:

$$p_{MAX} = \frac{F_{MAX}}{S_P}, \quad (17)$$

Na základě maximálního tlaku se počítá otevírací síla F_O tlakového stroje pro aplikaci metody squeeze casting.

$$F_O = p_{MAX} \cdot S_P, \quad (18)$$

kde značí: F_O – otevírací sílu tlakového stroje [N]

Otevírací síla nesmí přesáhnout hodnotu uzavírací síly:

$$F_U = (1,1 \text{ až } 1,2) \cdot F_O, \quad (19)$$

kde značí: F_U - uzavírací sílu tlakového stroje [N].

Velikost uzavírací síly F_U je dána převodní závislostí mezi teoretickou uzavírací silou hydraulického válce F_V , kde převod mechanického kloubového mechanismu je:

$$k(x) = \frac{F_U}{F_V}, \quad (20)$$

kde značí: F_V - sílu hydraulického válce.

Převod kloubového mechanismu se vypočítá z kinetických poměrů mechanismu, to je záležitostí výrobce stroje. Tuhost uzavíracího mechanismu c je poměr uzavírací síly F_U a celkové deformace x , kterou způsobí tato síla [5]:

$$c = \frac{F_U}{x}, \quad (21)$$

kde značí: x – deformaci uzavíracího mechanismu.

Uzavírací mechanismus stroje je propojen s lisovacím mechanismem stroje. Forma pro metodu squeeze casting obsahuje některé konstrukční záležitosti jako jsou u vysokotlakých forem, avšak má specifickou vtokovou soustavu, která i při vysokých tlakových poměrech musí zabezpečit laminární proudění taveniny do dutiny slévárenské formy.

Na obr. 2-11 je stroj pro výrobu odlitků metodou squeeze casting.



Obr. 2-11 Stroj pro výrobu odlitků metodou squeeze casting (DNR Techno Services Parda Bagh New Delhi, Indie) [21]



Obr. 2-12 Pohled na sekci strojů pro metodu squeeze casting (SCV Series Vertical Squeeze Casting Machine, firma Sanji) [22]



Obr. 2-13 Pohled do otevřené formy pro metodu squeeze casting [23]

2.5 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny hliníku jsou velmi používaným materiálem pro výrobu odlitků, vykazují poměrně příznivou tavící teplotu, která nepřesahuje teplotu 660 °C (teplota tavení čistého hliníku). Z hlediska možnosti zlepšení pevnostních vlastností vlivem tepelného zpracování (vytvrzování) se slitiny hliníku dělí na slitiny tepelně zpracovatelné (vytvrditelné), slitiny tepelně nezpracovatelné (nevytvrditelné).

Slévárenské slitiny hliníku se dále dělí na binární nebo ternární. Binární slitiny jsou nejčastěji typu: Al-Si, Al-Mn, Al-Cu, Al-Mg. Ternární slitiny jsou Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Cu-Mg. Označování slévárenských slitin hliníku je prováděno podle ČSN EN 1706. Touto normou, platnou pro slévárenské slitiny na výrobu odlitků, je stanoveno označování písmeny ve tvaru EN AC a pěti číslicemi. Jednotlivé části jdou v pořadí: EN – evropská norma, písmeno A určuje hliník, písmeno C určuje odlitky a pět číslic označuje chemické složení slitiny. První číslo v pětimístném číselném označení slitin hliníku je udáváno číslo skupiny slitiny stejně jako u označení slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků. V tabulce 2.1 je značení prvků ve slitinách hliníku.

Tabulka 2.1 Značení prvků ve slitinách hliníku [2]

Číselné označení slitiny	Dominantní prvek ve slitině hliníku
Řada 10000	Al minimálně 99% a více
Řada 20000	Slitina AlCu
Řada 30000	Slitina AlMn
Řada 40000	Slitina AlSi
Řada 50000	Slitina AlMg
Řada 60000	Slitina AlMgSi
Řada 70000	Slitina AlZn

Nejrozšířenější slévárenské slitiny hliníku jsou typu Al-Si, které jsou označovány pod obchodním názvem siluminy. Podle obsahu křemíku se dělí na:

- podeutektické (4,5 až 10) % Si;
- eutektické (10 až 13) % Si;
- nadeutektické, tj více než 13% Si.

Eutektické slitiny siluminů se vyznačuje vynikajícími slévárenskými i technologickými vlastnostmi, velmi dobrou odolností proti korozi a dobrou obrobiteľnosť. Slitina je vhodná pro všechny technologie odlévání, obvykle se odlévá do kovových nebo pískových forem. Má poněkud vyšší sklon k tvorbě staženin v silnějších stěnách odlítka. Před odléváním do pískových a kovových forem je nutná její modifikace taveniny. stronciem nebo sodíkem.

Slitiny hliníku, tj hliník a přísadové kovy, tvoří většinou tuhé roztoky, kde maximální rozpustnost v tuhém stavu je při eutektické teplotě. Rozpustnost s klesající teplotou klesá a s teplotou okolí je zanedbatelná.

Všechny poznatky získané při studiu literárních podkladů i při sestavování rešeršní části této práce byly využity při řešení vlastních experimentů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem mé bakalářské práce bylo experimentální sledování vlivu tlaku na krystalizaci slitiny hliníku AlSi12, tj. uplatnění metody squeeze casting. V tomto případě byla použita přímá metoda squeeze casting. Touto technologií lze vyrábět tvarové konstrukční díly s požadovanou hutností a kompaktní strukturou v celém objemu dílu.

Tento způsob technologie je založen na krystalizaci taveniny, na kterou působí vysoký lisovací tlak. V podmínkách řešení tohoto experimentu na našem pracovišti – Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci byl vysoký tlak vyvozen prostřednictvím lisu pro tváření kovů, na kterém byla upnuta kovová slévárenská forma specifické konstrukce. V tomto případě její dutina je pro odlitek tvaru komolého kužele. Na taveninu při krystalizaci působí speciální razník, který vyvozuje tlakovou sílu. Na obr. 3-1 je pohled na celkové ustavení formy na tvářecím lisu. Na obr. 3-2 je pohled na razník (vlevo) a na dutinu formy (vpravo). Na obr. 3-3 je vyobrazeno vlévání taveniny do dutiny formy a vyjímání ztuhlého odlitku z formy.

Při těchto experimentech je důležité, aby tavenina vyplnila co nejrychleji dutinu slévárenské formy speciální konstrukce, která je upnuta na tvářecím lisu. Současně toto řešení vychází z předpokladu, že tavenina musí vyplnit co nejrychleji dutinu této slévárenské formy. Dále je nutné, aby síla razníku působila na taveninu ihned, jak vyplní tavenina dutinu slévárenské formy. Tím se zamezí víření taveniny a vzniku vnitřních vad vyráběného odlitku metodou squeeze casting. Pro krystalizaci pod tlakem (metoda squeeze casting) je nutno, aby na taveninu byl vyvozen tlak cca 150 MPa. V případě řešení této bakalářské práce byl vyvozen i tlak vyšší, tj. 212 MPa tlak nižší, tj. 100 MPa.



Obr. 3-1 Pohled na celkové ustavení formy k hydraulickému lisu CBA 300/63

3.1 Charakteristika použitého zařízení

Pro sledování krystalizace pod tlakem byl vyroben speciální nástroj (tvořený razníkem a kovovou slévárenskou formou) v aplikaci s hydraulickým lisem typu CBA 300/63 (označení 300/63 znamená sílu vyvozenou vrchní/spodní částí lisu). Hydraulický lis, který využívá potenciální energie, která je dána tlakovým médiem (olej) v hlavním válci. Hydraulický lis je opatřen novou řídicí jednotkou a může vyvodit síly až 1500 [kN]. Jak již bylo uvedeno, hydraulický lis na obr. 3-1, se nachází na Katedře strojírenské technologie Technické Univerzity v Liberci v dílně inovačních technologií.

3.1.1 Charakteristika pracovního nástroje

Pracovní tvarový nástroj, se skládá v podstatě z kovové slévárenské formy s tvarovou dutinou a do této dutiny po nalití taveniny vjíždí razník jednoduchého tvaru. Nástroj je vyroben třískovým obráběním jako celý tvarový díl z oceli ČSN 19552 (chrom - molybden - křemík - vanadová ocel, která se používá ke kalení v oleji a na vzduchu, vykazuje velmi dobrou prokalitelnost a tím také dosahuje vysokou pevnost za tepla a odolností proti popuštění, dále vykazuje velmi dobrou houževnatost a plastické vlastnosti při normálních i zvýšených teplotách. Dále ocel vykazuje velmi dobrou odolnost proti vzniku trhlinek tepelné únavy a malou citlivost na prudké změny teploty a je vhodná pro výrobu nástrojů, které je nutno při práci chladit vodou. Ocel tepelným zpracováním získává vysokou pevnost až 1800 [MPa] Tato ocel je vhodná pro výrobu nástrojů pro tváření za tepla (tj. velmi namáhané malé a středně velké zápustky a vložky zápustek, tlakové formy, atd.). Při konstrukci do sebe zapadajících dílů bylo dbáno na to, aby byly vytvořeny potřebné vůle s ohledem na předeřev nástroje na teplotu cca 200 až 250 °C. Další důležitým prvkem nástroje je vyhazovač, který podle tvaru konstrukce dutiny nástroje musí zabezpečovat plynulé a rovnoměrné vysunutí vyrobeného dílu z nástroje. Současně důležitá je konstrukce a zaústění vtoku do dutiny nástroje. Musí zabezpečovat plynulé vtečení taveniny do dutiny nástroje v krátkém časovém okamžiku. Současně dutina nástroje musí být řešena i s ohledem na její vyhřívání. Nevyhříváný prostor způsobuje velké teplotní spády mezi taveninou a formou, což vede k povrchovým vadám výrobku rýhám a nebo zavaleninám. Dutina nástroje a těleso tvarového razníku musí být před prací ošetřena ochranným lubrikačním nástřikem, např.

prostředek je na bázi grafitu, který odolává vysokým teplotám, lze použít nástřik pod označením Molybkombin UMF T4, který vytváří film suchého maziva do teploty 450 °C a pro současnou dobu je ekologicky schůdný neobsahuje zapáchající činidla.

Dutina ve formě má tvar komolého kužele \varnothing 100 mm v horní části, \varnothing 90 mm v dolní části a výšku pracovní části 120 mm. Razník má rozměry \varnothing 100 mm a výšku 100mm. Speciální zařízení je opatřeno vtokovým kanálem pro eliminaci víření taveniny a klidný průběh celého procesu lití taveniny do dutiny raznice. Objem vlité taveniny činil asi 0,77 [dm³] a líc formy byl opatřen nástřikem. Tímto způsobem byly zhotoveny všechny zkoušené odlitky. Na obr. 3-2 je pohled do dutiny slévárenské (vlevo) a pohled na slévárenskou formu s razníkem jednoduchého válcového tvaru (vpravo).



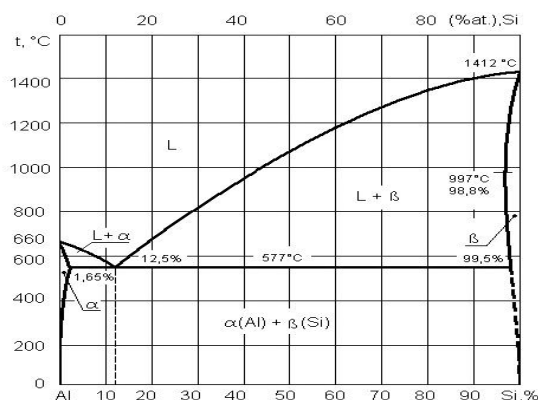
Obr. 3-2 Pohled do dutiny slévárenské formy (vlevo) a na formu s razníkem (vpravo)

3.2 Charakteristika použité slévárenské slitiny

Pro tento experiment výroby hmotných odlitků metodou squeeze casting byla použita slévárenská slitina siluminu EN AC - AlSi12, která se dodává ve formě hutnických housek. Pro tavení byla použita tavící skříňová odporová pec Clasic, výrobce Clasic, s.r.o (pro tavení slitin hliníku jsou výhodné i pece plynové). Tavenina před nalitím do nástroje bude metalurgicky ošetřena - rafinační solí T3, při průmyslovém uplatnění lze doporučit profouknutí taveniny před odléváním dusíkem. Dále bylo provedeno stažení strusky z povrchu taveniny. Pro přípravu taveniny byl použit grafitový kelímek o objemu 2 dm³. Po změření teploty taveniny slitiny AlSi12 měřícím digitálním termometrem GTH 1100 s termočláňkovým vodičem NiCr – Ni byla

tavenina nalita do kovové slévárenské formy a ihned stlačena příslušnou tlakovou silou (700 000 N, 1 000 000 N, 1 500 000 N). Tuto sílu vyvodil pohybující se válcový razník, viz obr. 3-2 vpravo.

Slitina AISi12 – je to eutektickou slitinu s výbornými slévárenskými i technologickými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, dobrou obrobiteľnosť a střední pevností. Slitina je vhodná na všechny technologie odlévání, nejčastěji se však lije do pískových forem nebo do kovových gravitačně nebo pod nízkým tlakem. Má silný sklon ke staženinám v silnějších stěnách. Při lití do pískové formy je nutné modifikovat sodíkem, při lití do kovové formy se obvykle modifikuje sodíkem nebo storciem, hlavně u odlitků se značně rozdílnou tloušťkou stěn. Používá se pro tenkostěnné odlitky s vysokou houževnatostí pro odlitky odolné proti korozi, lopatky, žebrovaná tělesa, skříňovitě odlitky atd. Na obr. 3-3 je uveden rovnovážný diagram Al-Si.



tavenina (L); α, β - tuhé roztoky
teploty tání: čistý hliník 660°C; čistý křemík 1412°C

Obr. 3-3 Rovnovážný diagram Al-Si (nemodifikovaná tavenina)

V tabulce 3-1 je uvedeno chemické složení slitiny AISi12, v tabulce 3-2 jsou uvedeny fyzikální vlastnosti slitiny AISi 12.

Tabulka 3-1 Chemické složení slitiny hliníku AISi12

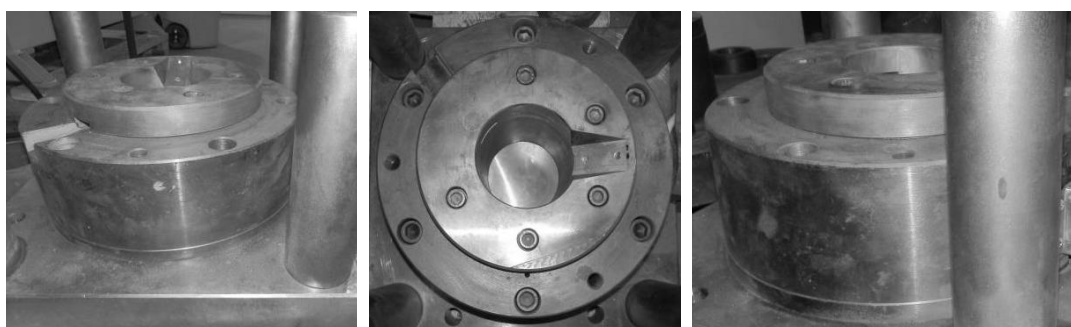
Obsah prvků ve slitině AISi12 [%]							
Al	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Cr	Zn
86,38	11,7	0,1	0,50	0,10	0,55	0,01	0,15
Ti	Ni	Pb	Ca	Na	Bi	Sb	Ostatní
0,15	0,10	0,10	0,009	0,006	-	-	0,15

Tabulka 3-2 Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi12

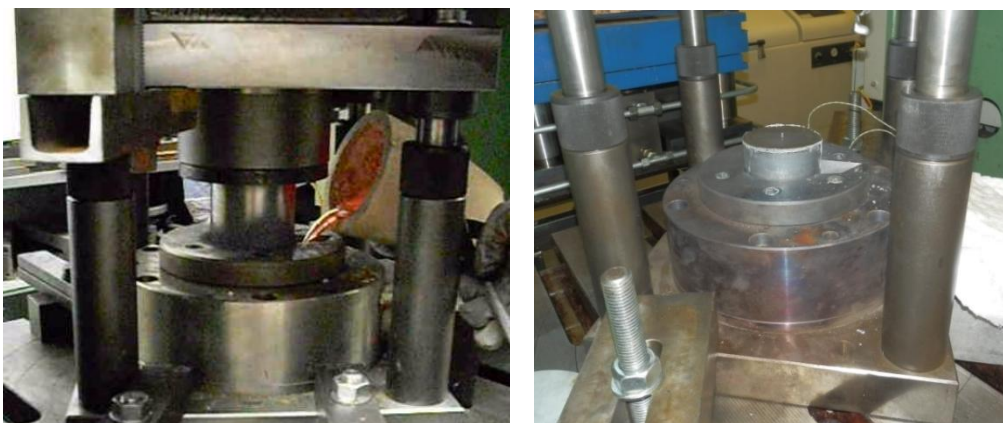
<i>Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi12</i>					
Hustota (20 °C) [kg.m ³]	Youngův modul [MPa]	Teplotní roztažnost [K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplota krystalizace [°C]	Elektrická vodivost [m.Ω ⁻¹ .mm ⁻²]
2650	72000	21,0.10 ⁻⁶	150	574 - 582	23

3.3 Metodika a provádění experimentů

Byla vypracována a odzkoušená metodika výroby dílů. Připravený tvářecí stroj lis typ CBA 300/63 s kovou slévárenskou formou, která byla ohřátá na teplotu 220 °C. Dále bylo nataveno odpovídající množství příslušné taveniny slitiny AlSi 12. Teplota taveniny při odlévání byla cca 720 °C. Jak již bylo uvedeno, před odléváním byla tavenina metalurgicky ošetřena. Takto ošetřené a odměřené množství taveniny bylo nalito do kovové slévárenské formy, která byla opatřena ochranným nástřikem. Po odlití ihned došlo k lisování taveniny v nástroji prostřednictvím tvarového razníku po určitou dobu 15 [s]. Po ztuhnutí taveniny je díl vyjmut prostřednictvím vyhazovače tvářecího stroje. Pro experimenty byly zvoleny tři hodnoty působící síly na taveninu v nástroji 700 000 [N], 1 000 000 [N] a 1 500 000 [N]. Na obr. 3-4a) je uveden pohled na slévárenskou formu. Na obr. 3-4b) je uvedeno odlévání taveniny do slévárenské formy (vlevo), a vyjímání ztuhlého odlitku vyrobeného stlačením tuhnoucí taveniny razníkem vpravo).



Obr. 3-4 a) Pohled na části experimentální formy s jejím vyhříváním



Obr. 3-4 b) Pohled na vlévání taveniny do formy; vyjímání odlitku z formy

Na obr. 3-5 jsou uvedeny vyrobené díly ze slitiny hliníku AlSi12. Na obr. 3-6 je schéma komolého kužele, který představuje tvar vyráběných odlitků.



Obr 3-5 Vyrobené masivní odlitky metodou squeeze casting ze slitiny AlSi12



$$2r_2 = 100 \text{ mm}, 2r_1 = 90 \text{ mm}, h = 100 \text{ mm}$$

Obr. 3-6 Tvar vyráběných odlitků ze slitiny AlSi 12

3.3.1 Stanovení staženin hliníku

Během prováděných experimentů bylo potřebné si uvědomit, že při tuhnutí slitin hliníku vzniknou staženiny. Tyto staženiny musíme nahradit přídavkem objemu navíc.

Objem této staženiny lze vypočítat na základě hustoty taveniny a hustotě slitiny v tuhém stavu. Teoretický výpočet objemu staženiny lze potom napsat jako:

$$V_t = V_z + V_s, \quad (22)$$

kde značí: V_t – objem taveniny; V_z – objem ztuhlé slitiny; V_s – objem staženiny.

S použitím zákona zachování hmotnosti lze napsat:

$$V_z \cdot \rho_z = V_t \cdot \rho_t, \quad (23)$$

kde značí: ρ_t – hustota taveniny za teploty tuhnutí; ρ_z – hustotu ztuhlého kovu za teploty tuhnutí.

Hustota taveniny slitiny AISi 12 při teplotě tuhnutí 577 °C je hustotu 2505 [kg.m⁻³], zatímco hustota ztuhlé fáze slitiny AISi 12 je při teplotě 577°C činí 2630 [kg.m⁻³]. Z rovnice (23) lze vyjádřit objem taveniny V_t . Po dosazení příslušných hodnot lze psát:

$$V_t = \frac{V_z \cdot \rho_z}{\rho_t} = \frac{2630}{2505} \cdot V_z = 1,05 \cdot V_z$$

Z toho plyne, že objem staženiny tvoří cca 5 % objemu ztuhlé slitiny. V této souvislosti je třeba upozornit, že hustotu slitiny ovlivňuje křemík, u kterého se s rostoucí teplotou hustota zvyšuje (při teplotě 20 °C je hustota křemíku 2330 kg.m⁻³ a při teplotě tání 1412 °C je hustota 2570 kg.m⁻³), [25]. Je proto nezbytně nutné s tímto zmenšením objemu dopředu počítat při stlačování taveniny, jinak by v průběhu experimentu došlo k náhlému poklesu síly od razníku tlačící na krystalizující taveninu.

3.3.2 Výpočet tlaku v dutině formy

Dále v rámci návrhu metodiky byl proveden výpočet tlaku vyvinutého v dutině formy. Síla, kterou byla tavenina stlačena v dutině raznice byla nastavena na maximální, tj. $F = 700\,000$ [N], $1\,000\,000$ [N] a $1\,500\,000$ [N]. Dále byl proveden výpočet tlaku působícího na krystalizující vzorek taveniny podle vztahu:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (24)$$

kde značí: **p** - tlak působící na vzorek taveniny [MPa]; **F** – sílu působící na taveninu [F]; **S** - plochu odlitku vyrobeného metodou squeeze casting [mm²].

V tabulce 3-3 jsou uvedeny hodnoty vypočítaného tlaku pro výše uvedené síly.

Tabulka 3-3 Hodnoty tlaku působící na krystalizující taveninu slitiny AlSi12

Tlaková síla [N]	700 000	1 000 000	2 000 000
Plocha vzorku [mm²]	7088,00		
Tlak [MPa]	100	141	282

Poznámka: Tavenina po krystalizaci pod tlakem tvoří ve formě útvar komolého kužele, výška H = průměr 100 mm D₁ = 100 [mm], D₂ = 90 [mm]. Plocha S = 7088 [mm²].

Z hodnot v tabulce 3-3 je zřejmé, jak se zvyšoval tlak působící na taveninu slitiny hliníku AlSi12 při působení různých tlakových sil (700 000 [N], 1 000 000 [N] a 1 500 000 [N]). Na obr. 3-7 je sestavená grafická závislost tlaku na tlakové síle.



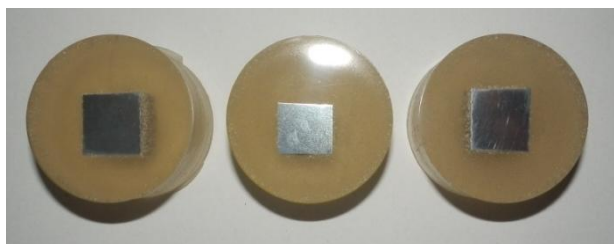
Obr. 3-7 Grafická závislost tlaku na tlakové síle (max. F = 1 500 000 [N])

3.4 Hodnocení struktury hliníkových odlitků

Z odlitých zkušebních těles, resp. odlitků vyrobených metodou squeeze casting ze slitiny AlSi12 byly připraveny vzorky pro metalografické pozorování struktury. Nejdříve byly odlitky mechanickou pilou rozdělané na větší celky, viz obr. 3-8 a z těchto dílů byly připraveny vzorky pro metalografické pozorování, které byly odebrány ze střední partie odlitků.



Obr. 3-8 Příprava vzorku pro metalografické pozorování z vyrobeného odlitku



(tlak: 100 MPa; 141 MPa, 282 MPa)

Obr. 3-9 Vzorky pro metalografické pozorování

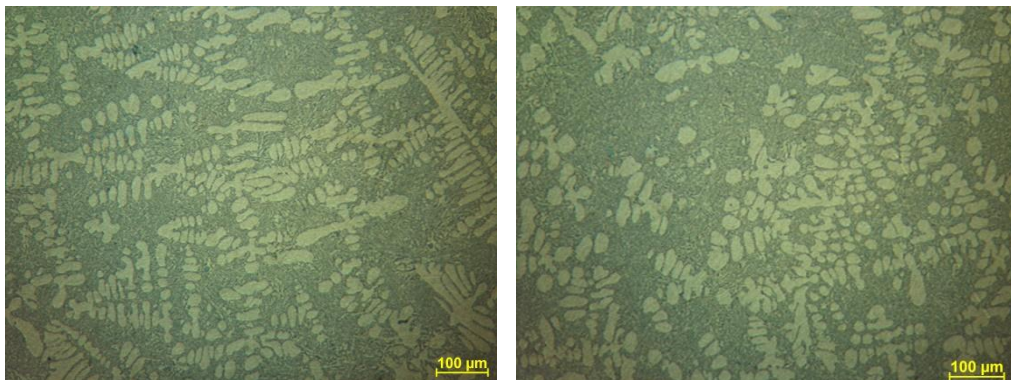
Metalografická příprava vzorků a pozorování jejich struktury bylo prováděno v metalografické laboratoři na Katedře strojírenské technologie. Vzorky uvedené na obr. 3-9 byly připraveny pro metalografické pozorování klasickým způsobem: zality do dentakrylové pryskyřice, broušeny na brusných papírech o zrnitosti 200, 400, 600 a 800, dále byly leštěny na plstěném kotouči za použití diamantové pasty.

Pro vyvolání struktury byl povrch vzorků leptán speciálně připraveným leptadlem 50% roztokem kyseliny chlorovodíkové v destilované vodě. Po naleptání byly vzorky připraveny k pozorování jejich struktury na světelným mikroskopem NEOPHOT 21 (výrobce Carl Zeiss Jena – SRN) ke kterému je připojena kamera a její obraz je hodnocen softwarem NIS Elementas AR a je znázorněn na displeji počítače viz obr. 3-10.

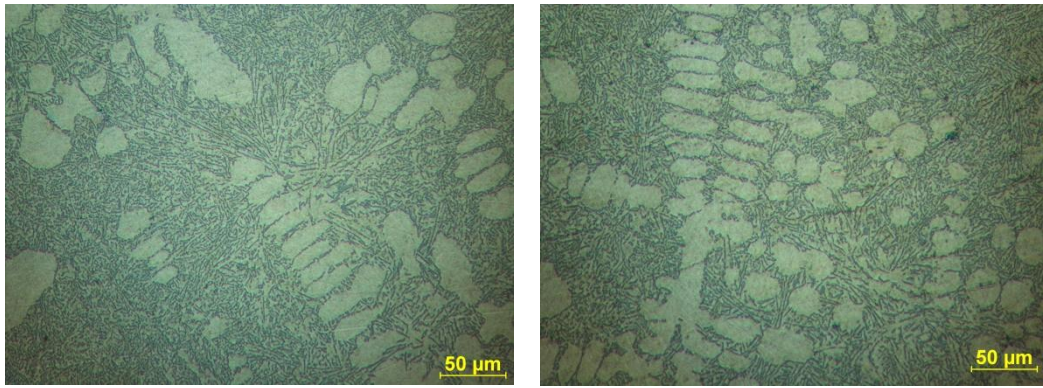


Obr. 3-10 Světelný mikroskop s kamerou a softwarem NIS Elementas AR

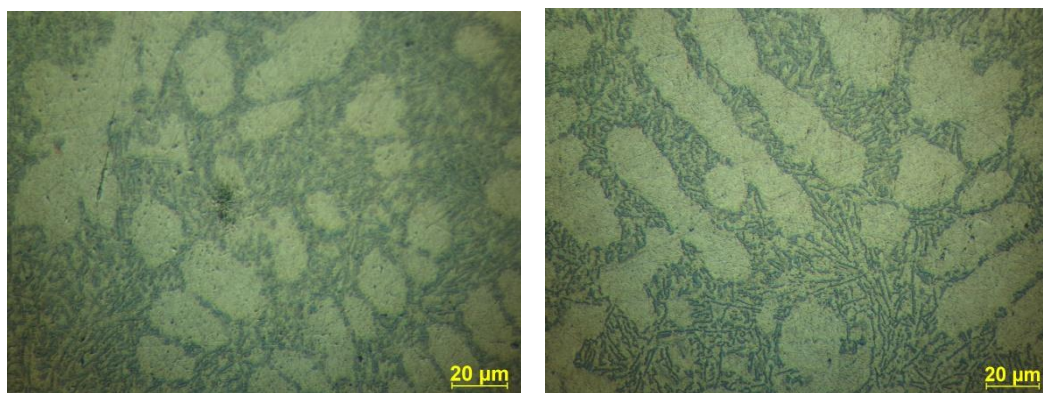
Získané mikrostruktury odlitků vyrobených metodou squeeze casting ze slitiny AlSi12 za působení tlaků (100 MPa, 141 MPa, 282 MPa) při jejich krystalizaci byly na mikroskopu sledovány při zvětšení 100x, 250 x a 500 x. Na obr. 3-11 až 3-13 je mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting, při působícím tlaku 100 MPa na krystalizující taveninu.



Obr. 3-11 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 100 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou



Obr. 3-12 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 100 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

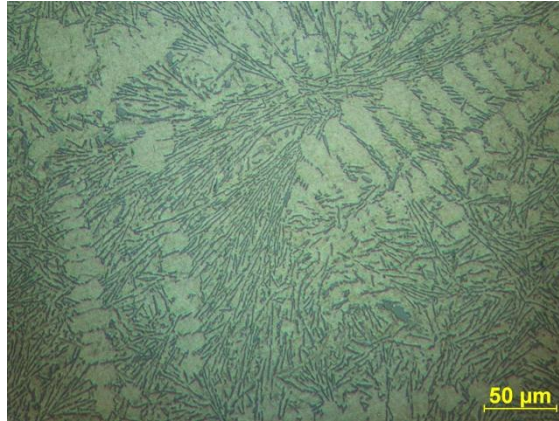


Obr. 3-13 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 100 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

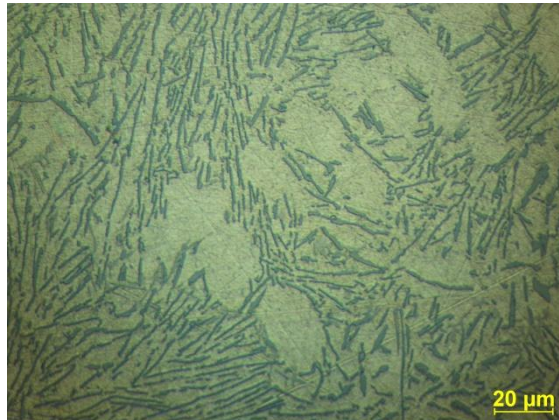
Na obr. 3-14 až 3-16 je mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting, při působícím tlaku 141 MPa na krystalizující taveninu.



Obr. 3-14 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 141 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

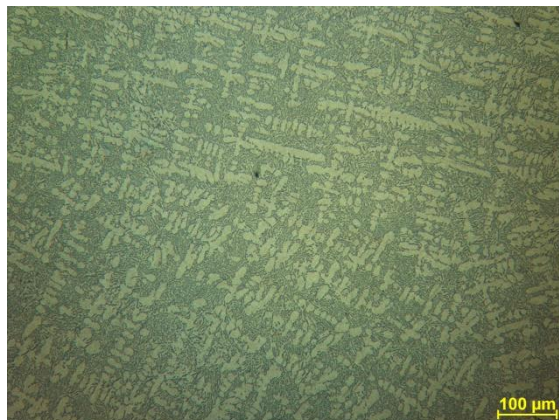


Obr. 3-15 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 141 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

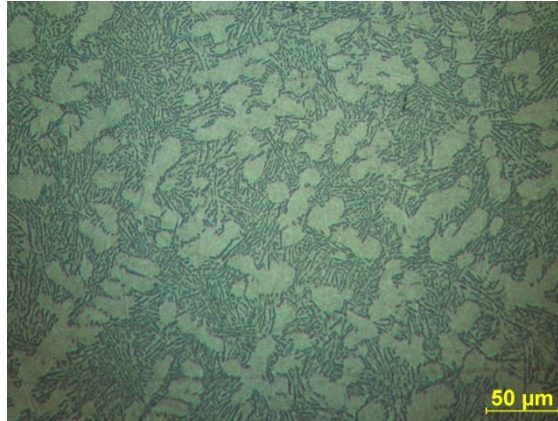


Obr. 3-16 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 141 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

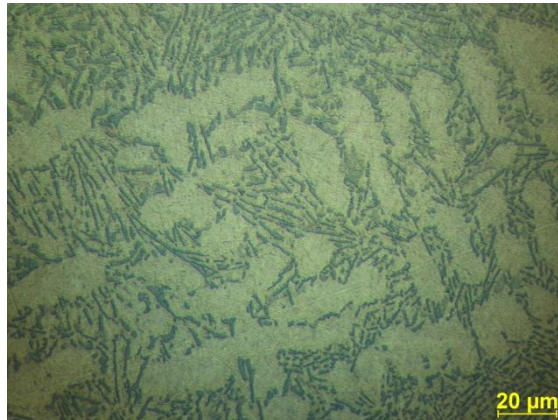
Na obr. 3-17 až 3-19 je mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting, při působícím tlaku 282 MPa na krystalizující taveninu.



Obr. 3-17 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 282 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou



Obr. 3-18 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 282 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou



Obr. 3-19 Mikrostruktura odlitku ze slitiny AlSi12, vyrobeného metodou squeeze casting (tlak 282 MPa), leptáno kyselinou chlorovodíkovou

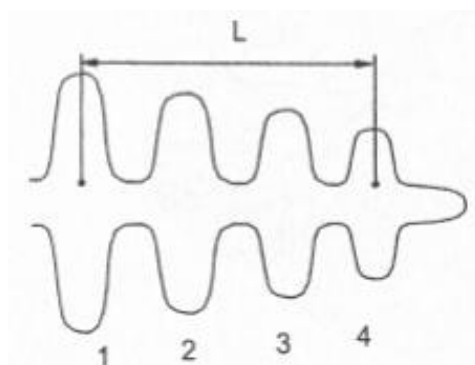
Na výše uvedených obrázcích mikrostruktur slitiny AlSi12 byla sledována zrna tuhého roztoku α (tuhý substituční roztok křemíku v hliníku, kde výrazně převládá hliník) – světlé oblasti. Dále vyloučeniny tuhého roztoku β (tuhý substituční roztok hliníku v křemíku, kde výrazně převládá křemík) – tmavé vyloučeniny.

Dále byla sledována dendritická struktura tuhého roztoku α . Pro popis dendritické struktury je nejdůležitějším kritériem vzdálenost sekundárních os dendritů, která je označovaná DAS (dendrite arm spacing). Hodnotu DAS lze vypočítat:

$$DAS = \frac{L}{n-1}, \quad (25)$$

kde značí: L – celková délka dendritu; n – celkový počet sekundárních os dendritu.

Na obr. 3-20 je schéma dendritu pro výpočet hodnoty DAS.



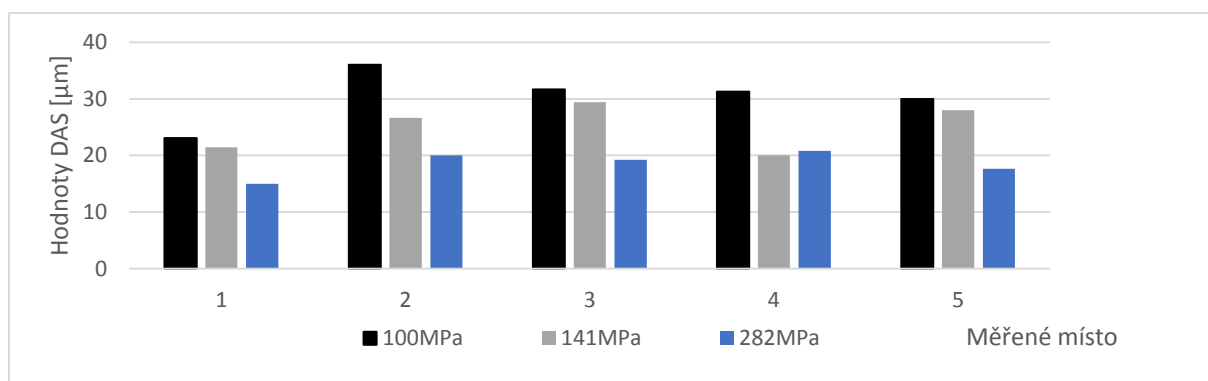
Obr. 3-20 Schéma dendritu pro výpočet hodnoty DAS

Z výše uvedených příslušných mikrostruktur byly vypočítány podle vztahu (25) hodnoty DAS, které jsou pro jednotlivé odlitky uvedeny v tabulce 3-4.

Tabulka 3-4 Výsledky hodnocení dendritické struktury, hodnoty DAS

Slitina AlSi12			
Měřené místo	Působící tlak [MPa] na krystalizující taveninu slitiny AlSi12		
	100	141	282
	DAS = L / (n-1) [μm]		
1	23,1	21,4	15,0
2	36,0	26,7	20,0
3	31,7	36,7	19,3
4	31,3	20,0	20,8
5	30,0	28,0	17,7
Statistické vyhodnocení naměřených hodnot DAS			
Aritmetický průměr \bar{x} [μm]	30,4	26,6	18,6
Směrodatná odchylka s [μm]	4,2	5,9	2,1
Variační koeficient v [1]	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$

Naměřené výsledky, uvedené v tabulce 3-4, byly statisticky zpracovány podle vztahů (29) až (31). Hodnoty aritmetického průměru byly graficky zpracovány, viz obr. 3-21.



Obr. 3-21 Závislost hodnoty DAS na tlaku pro určitá místa měřeného odlitku

3.4.1 Shrnutí výsledků metalografického pozorování a naměřených výsledků DAS

Z metalografických výsledků je zřejmé, že nově použité leptadlo kyselina chlorovodíková také se osvědčila při leptání mikrostruktury odlitků zpracovaných metodou squeeze casting z hliníkové slitiny AlSi12. Dendritická struktura tuhého roztoku α je z obrázků 3-11 až 3-19 dobře identifikovatelná. Pokud se týká hodnocení kritéria DAS (vzdálenost sekundárních os dendritů, které je označované, dendrite arm spacing). Při působení tlaku 100 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS 30,4 [µm], hodnota směrodatné odchylky 4,2 [µm] a hodnota variačního koeficientu $1,4 \cdot 10^{-1}$. Při působení tlaku 141 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS 26,6 [µm], hodnota směrodatné odchylky 5,9 [µm] a hodnota variačního koeficientu $2,2 \cdot 10^{-1}$. A při působení tlaku 282 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS 18,6 [µm], hodnota směrodatné odchylky 2,1 [µm] a hodnota variačního koeficientu $1,1 \cdot 10^{-1}$. Porovnáním hodnot DAS při působení tlaku 100 MPa (30,4 [µm]) a při tlaku 282 MPa (18,6 [µm]) je zřejmé, že se liší o cca 40 %. Výsledky uvedené v tabulce 3-4 také potvrzují předpoklad, že s rostoucím tlakem působícím na taveninu při její krystalizaci se zmenšují zrna příslušných fází, především tuhého roztoku α .

3.5 Hodnocení tvrdosti vzorků

Pro měření tvrdosti odlitků ze slitiny hliníku AlSi12 bylo použito měření podle Brinella. (Brinell byl švédský výzkumník kovových materiálů, v roce 1900 na druhé mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu předložil svou metodu pro měření tvrdosti kovů). Tato metoda se velmi rozšířila a je dnes používána ve všech průmyslových státních normách, např. ČSN 42 0371, ČSN EN 10003-1). Tato metoda se používá pro měření tvrdosti měkkých kovových materiálů (nekalené oceli, litiny, slitin hliníku, atd. Podstatou Brinellovy metody je vtlačování kalené ocelové kuličky (dnes se používá i kulička ze slinutého karbidu) o průměru D do vyleštěné plochy zkoušeného materiálu konstantním zatížením. Po vtlačení kuličky do kovu získáme průměr vtisku d . Pro stanovení tvrdosti se hodnotí na sebe dva kolmé průměry vtisků, výsledný průměr vtisku $d = (d_1 + d_2)/2$. Z tohoto výsledku dvou průměrů vtisku se stanovuje tvrdost, podle známých vztahů:

$$HB = \frac{F}{S}, \quad (26)$$

$$HB = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h}, \quad (27)$$

$$HB = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (28)$$

kde značí: F – zátěžnou sílu [kp, N] (1 kp = 9,81 N), S – plochu kulového vrchlíku vytvořeného vtlačenu kuličkou [mm^2], h – hloubku vtisku [mm], D – průměr kuličky [mm], d – výsledný průměr vtisku [mm].

Hodnota zátěžné síly je závislá na průměru použité kuličky, $F = k \cdot D^2$. ($D = 10; 5; 2,5; 1,25; 0,625$ mm). Pro neželezné kovy $k = 10$, pro měkké neželezné kovy a kompozice $k = 2,5$. Měřená tvrdost musí být u neželezných materiálů od kraje 3· d . Průměr vtisku se musí pohybovat v rozmezí 0,25· D až 0,60· D . Doba zatížení se volí pro neželezné kovy 60 s, pro velmi měkké neželezné kovy až 180 s.

V technické praxi existují přepočební tabulky, kde na základě výsledné hodnoty průměru vtisku je přiřazená hodnota příslušné tvrdosti. Dnes již moderní zařízení pro měření tvrdosti ukazují výslednou tvrdost na monitoru zařízení.

Norma pro zkoušku tvrdosti podle Brinella ČSN EN 1003-1 rozlišuje hodnotu tvrdosti HBS a HBW, podle toho, zda-li byla pro zkoušku tvrdosti použita kalená kulička nebo kulička ze slinutého karbidu.

Tvrdość podle Brinella byla stanovena podle normy ČSN EN 1003-1. K měření bylo použito zařízení WPM – 308. Na základě ČSN EN 1003-1 byla použita kulička průměru 2,5 mm, zátěžná síla 62,5 kp, tj. 613 N, doba působení 60 s).



Obr. 3-22 Měření tvrdosti vzorků odlitků ze slitiny hliníku AlSi12

V tabulce 3-5 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti naměřené na vzorcích příslušných odlitků ze slitiny AlSi 12 vyráběných metodou squeeze casting (působící tlak na krystalizující taveninu 100, 141 a 282 MPa).

Tabulka 3-5 Přehled naměřených a vypočítaných hodnot tvrdosti podle Brinella na odlitcích ze slitiny AlSi12 vyráběných metodou Squeeze casting (100, 141 a 282 MPa)

Hodnoty tvrdosti podle Brinella								
HBS								
Působící tlak [MPa]	Místo měření					Aritmetický průměr \bar{x}	Směrodatná odchylka s	Variační koeficient V
	1	2	3	4	5			
100	83	86	85	86	86	85,2	1,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$
141	87	89	89	89	88	88,4	0,80	$9,1 \cdot 10^{-3}$
282	91	90	90	92	91	90,8	0,75	$8,3 \cdot 10^{-3}$

Na základě hodnot tvrdosti podle Brinella, uvedených v tabulce 3-5 byly stanoveny hodnoty statistických veličin:

Aritmetický (výběrový) průměr \bar{x} – jak je obecně známo, je průměrná hodnota z hodnot příslušného statistického souboru:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (29)$$

kde značí: x_i - je i -tý prvek statistického souboru, n – počet prvků příslušného statistického souboru.

Rozptyl s^2 a výběrová směrodatná odchylka s

Rozptyl (též střední kvadratická odchylka, střední kvadratická fluktuace, variace nebo také disperze), charakterizuje variabilitu rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, která vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty.

Směrodatná odchylka s je charakteristikou proměnlivosti (variability) statistického souboru. Známe-li střední hodnotu jinak neznámého rozdělení naměřených dat, výběrová směrodatná odchylka se počítá jako kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od střední hodnoty. V častějším případě, kdy střední hodnota rozdělení není známa a je odhadnuta aritmetickým průměrem, se používá vzorec:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (30)$$

Variační koeficient v – je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, stanovuje se ze vzorce:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (31)$$

kde značí: s – směrodatnou odchylku, v tomto případě směrodatnou odchylku tvrdosti HBS, \bar{x} – průměrnou hodnotu, v tomto případě hodnotu tvrdosti HBS z daného souboru měření.

Medián – je prostřední hodnota statistického souboru, který je podle velikosti příslušných hodnot. Prostřední prvek se stanovuje dle vzorce:

$$\text{Pořadové číslo prostředního prvku: } \tilde{x} = \frac{n+1}{2}, \quad (32)$$

kde značí: \tilde{x} - pořadové číslo středního prvku, n – počet prvků příslušného statistického souboru.

3.5.1 Shrnutí výsledků tvrdosti

Výsledky naměřené tvrdosti vzorků odlitků vyráběných metodou squeeze casting (tlaky na krystalizující taveninu 100, 141 a 282 MPa) z hliníkové slitiny AlSi 12 potvrzují předpoklad, že s rostoucím tlakem se tavenina více zhutňuje a současně přispívá k jemnější krystalizaci fází, které struktura hliníkové slitiny AlSi12 obsahuje. Hodnocení tvrdosti vzorků odlitků ze slitiny AlSi12 bylo provedeno dle metody podle Brinella, viz ČSN EN 10003-1. Byla použita kalená ocelová kulička průměru 2,5 mm, zátěžná síla 62,5 kp (tj. 613 N), doba působení síly byla 60 s.

Při působení tlaku 100 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 85,2; hodnota směrodatné odchyly HBS = 1,2 a hodnota variačního koeficientu $1,3 \cdot 10^{-1}$. Při působení tlaku 141 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 88,4 hodnota směrodatné odchyly HBS se rovná 0,80 a hodnota variačního koeficientu $9,0 \cdot 10^{-3}$. A při působení tlaku 282 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 90,8; hodnota směrodatné odchyly HBS je 0,75 a hodnota variačního koeficientu $8,3 \cdot 10^{-3}$.

Medián \tilde{x} je ukazatelem střední hodnoty, v případě pro působící tlak 100 MPa na odlitek ze slitiny AlSi12 je 86. Medián \tilde{x} je pro působící tlak 141 MPa na odlitek ze slitiny AlSi12 89 a pro působící tlak 282 MPa na odlitek ze slitiny AlSi 12 je 91.

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky a poznatky obsažené v této bakalářské práci přináší dílčí informace o relativně nové metodě – krystalizace odlitků pod tlakem (squeeze casting), která je důležitá pro výrobu hmotných odlitků od kterých se vyžaduje minimální porózita a minimální obsah vnitřních vad odlitku.

Při metodě krystalizace taveniny pod tlakem (squeeze casting) vznikají příznivé podmínky na krystalizaci taveniny než je tomu při odlévání odlitků vysokotlakým způsobem. Při metodě squeeze casting dochází k tzv. atermickému podchlazení taveniny, což má příznivý vliv na vznik kritické velikosti krystalizačních zárodků a následně i na průběh krystalizace.

Na základě literárního průzkumu je možno konstatovat, že o metodě krystalizace pod tlakem (squeeze casting) je v současné době dosti publikací, které se zabývají především metodikou hodnocení vyráběných odlitků, avšak je známo málo prací, které by publikovaly výrobu odlitků podle této metody. Problematikou squeeze casting se v současné době zabývají výzkumníci: BATYŠEV [3], SOBCZAK [4], SUZUKI [5], YANG [6], FUJII [9], atd.

V Česku je přední slévárnou TOP Alulit Benešov u Prahy, který se v současné době podílí na výrobě odlitků pro automobilový průmysl a uplatňuje metodu squeeze casting, [29]. Tato slévárna hodnotí odlitky vzhledově, popř. provede řezy náhodně vybranými odlitky a sleduje jejich kompaktnost, popř. nechá z těchto odlitků zhotovit tělíška pro zkoušku v tahu.

V rámci řešení této bakalářské práce je nutno konstatovat, že její obtížnost spočívá nejen na prováděných experimentech a na volbě vhodné metodiky pro výrobu a vyhodnocení kvality získaných odlitků, ale především na dostupnosti potřebného zařízení, jako je hydraulický lis nebo speciálně konstruovaná slévárenská forma, s jejím vyhříváním.

V rámci řešení této bakalářské práce byla navržena a uplatněna metodika, jejíž hlavním cílem bylo:

- a) Provést kvalitní přípravu taveniny slitiny hliníku AlSi 12 a její předehtání na manipulační teplotu 720 °C, včetně jejího metalurgického ošetření a za stejných experimentálních podmínek zabezpečit její nalití do slévárenské formy upnuté na hydraulickém lisu.

- b) Zabezpečit stlačení taveniny ve slévárenské formě, tak aby tato činnost korespondovala stejně se všemi prováděnými experimenty.
- c) Vyhodnocení získaných odlitků. Byla stanovena metodika hodnocení mikrostruktury odlitků, především na stanovení DAS dendritické struktury fáze α . Dále byla vypracována metodika pro stanovení tvrdosti odlitků.

Metodika vyhodnocení mikrostruktury odlitků ze slitiny AlSi12 byla zaměřena na hodnocení kritéria DAS (vzdálenost sekundárních os dendritů, které je označované, dendrite arm spacing). V rámci prováděných experimentů byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS, hodnota směrodatné odchylky DAS a hodnota variačního koeficientu.

Metodika měření tvrdosti odlitků ze slitiny AlSi12 bylo provedeno dle metody podle Brinella, kterou popisuje ČSN EN 10003-1. Pro měření tvrdosti byla použita kalená ocelová kulička průměru 2,5 mm, zátěžná síla 62,5 kp (tj. 613 N), doba působení síly byla 60 s. Naměřené hodnoty tvrdosti HBS byly též statisticky vyhodnoceny, byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS, hodnota směrodatné odchylky HBS a hodnota variačního koeficientu.

5. ZÁVĚR

Úkolem mé bakalářské práce bylo sledování krystalizace taveniny slitiny hliníku AlSi12 zatížených silou hydraulického lisu a vyvozuji tlak 100, 141 a 282 MPa. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí:

Teoretická část bakalářské práce obsahuje problematiku sledování krystalizace taveniny za vyššího tlaku (metoda squeeze casting) a vysvětluje podstatu vzniku krystalizačního zárodku v závislosti na vyšším tlaku.

Experimentální část práce je zaměřena na sledování krystalizace slitiny hliníku AlSi12 pod tlakem v závislosti na zatížení krystalizující taveniny lisem CBA 300/63 v rozmezí (700000N, 1000000 N, 2000000 N), na zkoušky tvrdosti vzorků v závislosti na zatěžovací síle lisu, resp. na tlacích 100 MPa, 141 MPa a 282 MPa. Byla sledována mikrostruktura odlitků ze slitiny AlSi12. Dále byla u slitiny AlSi12 hodnocena vzdálenost sekundárních os dendritů (DAS).

Z řešení této bakalářské práce lze na základě naměřených výsledků konstatovat tyto dílčí závěry:

1) Prováděné experimenty v rámci výroby odlitků ze slitiny AlSi12 metodou squeeze casting lze na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci dobře realizovat. Pracoviště má potřebný tvářecí lis i speciálně vyrobenou kovovou formu. Dále pracoviště má odpovídající tavící zařízení na přípravu a metalurgické ošetření potřebné taveniny slitiny hliníku AlSi12.

2) Pro vyhodnocení mikrostruktury vyrobených odlitků ze slitiny AlSi 12 je postačující světelný mikroskop Neophot 21 výrobce Carl Zeiss Jena s kamerou NIKON a softwarem NIS ELEMENTS AR. Bylo zjištěno, že s rostoucím zatížením se hodnoty snižují a struktura je jemnozrnější.

Vyhodnocením kritéria DAS bylo zjištěno, že Při působení tlaku 100 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS 30,4 [μm], hodnota směrodatné odchylky 4,2 [μm] a hodnota variačního koeficientu $1,4 \cdot 10^{-1}$. Při působení tlaku 141 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru DAS 26,6 [μm], hodnota směrodatné odchylky 5,9 [μm] a hodnota variačního koeficientu $2,2 \cdot 10^{-1}$. A při působení tlaku 282 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena

hodnota aritmetického průměru DAS 18,6 [μm], hodnota směrodatné odchylky 2,1 [μm] a hodnota variačního koeficientu $1,1 \cdot 10^{-1}$. Porovnáním hodnot DAS při působení tlaku 100 MPa (30,4 [μm]) a při tlaku 282 MPa (18,6 [μm]) je zřejmé, že se liší o cca 40 %. Dále bylo potvrzeno, že s rostoucím tlakem působícím na taveninu při její krystalizaci se zmenšují zrna příslušných fází, především tuhého roztoku α .

3) Hodnocení tvrdosti vzorků odlitků ze slitiny AlSi12 bylo provedeno dle metody podle Brinella, viz ČSN EN 10003-1. Byla použita kalená ocelová kulička průměru 2,5 mm, zátěžná síla 62,5 kp (tj. 613 N), doba působení síly byla 60 s. Bylo zjištěno, že s rostoucím tlakem působícím na taveninu slitiny AlSi12 se hodnoty tvrdosti nepatrně zvyšují.

a) Při působení tlaku 100 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 85,2; hodnota směrodatné odchylky HBS = 1,2 a hodnota variačního koeficientu $1,3 \cdot 10^{-1}$.

b) Při působení tlaku 141 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 88,4 hodnota směrodatné odchylky HBS se rovná 0,80 a hodnota variačního koeficientu $9,0 \cdot 10^{-3}$.

c) A při působení tlaku 282 MPa na krystalizující taveninu slitiny AlSi12 byla stanovena hodnota aritmetického průměru HBS 90,8; hodnota směrodatné odchylky HBS je 0,75 a hodnota variačního koeficientu $8,3 \cdot 10^{-3}$.

4) Prováděné experimenty v rámci metody squeeze casting jsou velmi časově a experimentálně náročné. Je potřeba provést odlití většího počtu odlitků, aby výsledky mohly být statisticky zhodnoceny s přesnějším vypovídajícím výsledkem.

Z důvodu, že práce je zaměřena spíše na základní výzkum, nebylo provedeno ekonomické hodnocení přínosu řešení práce.

6. SEZNAM LITERATURY

- [1] FRANKLIN, J.R, DAS A.A. *Squeeze casting - A Review of the Status*. The British Foundryman, vol. 77 No. 3 pp. 150 - 158. (1984).
- [2] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2001, 80-7204-193-2.
- [3] BATYŠEV, A. I.: *Crystallization of metals and alloys under pressure*. 2nd Edition, Metallurgija, Moskva, 1990 (in Russia).
- [4] SOBCZAK, J.J, DRENCHEV, L., ASTHANA, R. *Effect of Pressure on Solidification of Metallic Materials*. REWIEW International Journal of Cast Material Research, vol. 25. No1., 2012, pp. 1-14.
- [5] SUZUKI, S. *Gisserei* No. 10/11, 1989, 380-382.
- [6] YANG, L.J. *The Effect of Casting temperature on the Properties of Squeeze Casting Aluminium and Zinc Alloys*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 140, Iss.1-3 2003, p. 391 to 396.
- [7] *Handbook of chemistry and physics*, 91st edn; web version.
- [8] BROSHA, E., MAKOV, G. SHNECKA, R. Z. *Calphad*, 2007, 31, 173– 185.
- [9] FUJII, M. a kol. *Aluminium* 1985, No. 9 p. 673-678.
- [10] CUKUDA, m et al. *British Foundryman*, 1978 No. 8. P 512-517.
- [11] NISHIDA, Y., MATSUBARA, H. *British Foundryman*, 1976, No. 69, p. 274-278.
- [12] ZACHAROV, M.N. *Izvestija VUZ, Mašinstrojenje*, 1987, No. 5, p. 85-88.
- [13] HOLEČEK, S. et al. *Aluminium* 1988, No. 1, p. 80-83.
- [14] LIPČIN, T.N. *Fyzika metallov i metallovedenije*. 1986, No. 2 p. 398-401.
- [15] CLEGG, A.J. *Foundry Trade Journal*, 1988, No. 3, p. 31-38.
- [16] WILLIAMS, G. *Foundry Trade Journal*, 1984, No. 7, p. 387-392.
- [17] BALANDIN, G.F. *Kristallization und Kristallstruktur in Gussstücken*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1974.
- [18] BORISOV, G.P. *Davlenije v upravljeniji litejnymi processami*. Kijev, Naukovaja dumka. 1988.
- [19] VILČKO, J. DŽUGAS, P. *Litie s tuhnutím pod tlakom zo sliatin typu Al-Si - Údod do problematiky technológie výroby vysokokvalitných odliatkov (časť I.) Slévárenství* 1990, č. 12 s. 499-504.
- [20] *Podkladové materiály firmy ALPHACRAFT PVT. LTD. Coimbatore, Tamil Nadu, India.*

- [21] Podkladové materiály firmy DNR Techno Services Parda Bagh New Delhi, Indie.
- [22] Podkladové materiály firmy Sanji - SCV Series Vertical Squeeze Casting Machine, Indie.
- [23] Podkladové materiály firmy ALPHACRAFT PVT. LTD, 120/2A, Karayampalayam Road, Mylappatti Post, Coimbatore – 641 062. Tamilnadu, INDIA
- [24] Physical properties AISi12 aluminium alloys (230). Materilas Databases. <http://www.matweb.com>.
- [25] CAMBEL, J. *Castings*. Butterworth Heinemann, 1995, ISBN 0 7506 16962.
- [26] RAGAN, E, *Liatie kovov pod tlakom*. FVT Prešov 2007, ISBN 978-80-8073-979-9.
- [27] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálu*. SNTL Praha 1989.
- [28] ČSN EN 10 003 -1 Zkušební metoda podle Brinella [420359].
- [29] Podkladové materiály slévárny TOP Alulit Benešov u Prahy.