



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Sledování krystalizace odlitků litých pod tlakem

Monitoring of the crystallization of pressure die-casting

Roman Labai
KSP – SM - 513

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Iva Nová, Csc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Iva Nováková

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 74
Počet tabulek: 19
Počet obrázků: 30
Počet příloh: 4

Datum: 26.5.2006



A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Roman Labai
Téma práce: Sledování krystalizace odlitků litých pod tlakem
Monitoring of the crystallization of pressure die-casting

Číslo DP:
Vedoucí DP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci
Konzultant: Ing. Iva Nováková, - TU v Liberci

Abstrakt:

Tato diplomová práce pojednává o technologii vysokotlakého lití hliníkových slitin a sledování vlivu dotlaku na krystalickou strukturu vybraných odlitků. Obsahuje teoretickou část a praktickou část. V teoretické části je popsána, krystalizace hliníku a jeho slitin, charakteristika tlakových strojů a tlakových slitin a jejich technologických vlastností. Praktická část je za měřena na metalografické hodnocení slitin hliníku pomocí softwaru Lucia.5, a na hodnocení změny mechanických vlastností vlivem působícího dotlaku.

Abstract:

This diploma work discusses technologies of aluminium alloy high pressure pouring and monitoring of pressure influence at crystallic structure of chosen cast. It contains theoretical and practical part. There is described the aluminium crystallization and its alloys, characteristic of the pressure units and a die cast, a melting equipment description, and overview of the cast alloy and its technologic properties. The practical part is specialized in metallograpfical evaluations of the aluminium alloy wia Lucia.5 software; and for the changes evaluation of applied pressure impact on mechanical properties.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci,

.....

Roman Labai
Hlubočská 131
280 02 Kolín VI



Poděkování

Děkuji své vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantce Ing. Ivě Novákové za cenné rady a připomínky, které přispěly k jejímu vytvoření.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	11
2.1 Charakteristika hliníku a hliníkových slitin.....	11
2.1.1 Výroba hliníku.....	11
2.1.2 Čistý hliník a vnitřní atomová struktura.....	12
2.1.3 Krystalizace taveniny hliníku.....	14
2.1.4 Homogenní krystalizace.....	14
2.1.5 Heterogenní krystalizace.....	16
2.1.6 Růst krystalu.....	18
2.2 Metody tlakového lití.....	21
2.2.1 Tlakové lití a jeho význam pro výrobu odlitků.....	21
2.2.2 Rozdělení strojů pro tlakové lití.....	22
2.2.3 Tlakové stroje pro odlévání hliníku.....	23
2.2.4 Pracovní cyklus tlakového stroje.....	24
2.2.5 Výhody a nevýhody tlakového lití.....	26
2.2.6 Charakteristika odlitků litých pod tlakem.....	27
2.3 Tavicí agregáty.....	27
2.3.1 Charakteristika a druhy elektrických tavicích agregátů.....	29
2.3.2 Charakteristika a druhy palivových tavicích agregátů.....	31
2.4. Rafinace a odplyňování slitin hliníku.....	33
2.4.1 Vznik a povaha nečistot.....	34
2.4.2 Metody rafinace roztaveného hliníku.....	34
2.4.3 Speciální metody rafinace hliníku.....	40
2.5 Slévárenské slitiny hliníku.....	43
2.5.1 Legování slitin hliníku.....	43
2.5.2 Slitiny hliníku s křemíkem.....	46
2.5.3 Slitiny hliníku s hořčíkem.....	50
2.5.4 Slitiny hliníku s mědí.....	51
2.5.5 Slitiny hliníku se zinkem.....	51

2.5.6 Ložiskové slitiny hliníku	51
2.6 Technologické vlastnosti	51
2.6.1 Teplota tuhnutí	52
2.6.2 Tepelná vodivost	53
2.6.3 Obsah plynů v roztavené slitině	53
2.6.4 Zabíhavost	53
2.6.5 Stahování	54
2.6.6 Smršťování	55
2.6.7 Sklon k trhlinám a prasklinám	55
3. Experimentální část	56
3.1 Popis výroby tlakově litých odlitků	57
3.2 Metalografie a hodnocení struktury	60
3.2.1 Měření a zpracování výsledků	62
3.3 Stanovení mechanických vlastností	68
3.3.1 Zkouška tahem	68
3.3.2 Zkouška tvrdosti	70
4. Diskuze výsledků	74
5. Závěr	77
6. Seznam použité literatury	79
7. Seznam příloh	

Seznam použitých zkratk a symbolů

ΔG_c	celková změna Gibbsovy energie	[kJ]
r_k	kritický poloměr zárodku	[m]
V	krystalizační objem zárodku	[m ³]
σ_{ct}	povrchové napětí na rozhraní částice- tavenina	[N.m ⁻¹]
σ_{ck}	povrchové napětí na rozhraní částice - krystal	[N.m ⁻¹]
σ_{kt}	povrchové napětí na rozhraní krystal – tavenina	[N.m ⁻¹]
φ	úhel smáčení	
ρ	poloměr dendritu	[m]
b	velikost poloosy dendritu	[m]
p	tlak pístu	[MPa]
v	rychlost pístu	[m.s ⁻¹]
α	substituční tuhý roztok křemíku v hliníku	
FDU	označení přístroje na odplynování (Foundry Degassing Unit)	
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
HB	tvrdost	
F	zatěžující síla	[N]
t	doba působení	[s]

1. ÚVOD

Rychlý růst spotřeby hliníku a jeho průmyslové využití během více než sto let nemá mezi kovy obdoby.

Hliník se vyskytuje v zemské kůře v objemu 8 hmotnostních procent. Zaujímá tedy třetí místo za kyslíkem a křemíkem. Vzhledem k velké příbuznosti ke kyslíku je výroba hliníku z rud velmi obtížná. Proto byla průmyslová výroba hliníku zahájena teprve v moderní době. K obecnému rozšíření bylo však zapotřebí ještě dalších základních objevů [1].

Mezi nejvýznamnější patří vynález slitin vysoké pevnosti (AlCuMg), vynález způsobu výroby hliníku vyšší a vysoké čistoty, objev výborně slévateľných slitin (AlSi), vynález technologie svařování v ochranné atmosféře atd.

Vlastnosti hliníku a hliníkových slitin byly velmi často porovnávány s vlastnostmi oceli, která pochopitelně v době objevu výroby hliníku byla již vyráběna ve velkém rozsahu. Také při praktickém uplatnění se vždy vycházelo ze zkušeností s železem a ocelí, zpočátku bez zřetele k zvláštním vlastnostem hliníku. To mělo za následek špatné výsledky v různých oborech, ať již šlo o použití pro konstrukční účely, svařování, pro výrobu chemických zařízení atd.

Teprve později se začalo přihlížet k specifickým vlastnostem hliníku, a v posledních letech se stále více uplatňuje zásada praktického použití, kdy je nutno v praxi před použitím uvažovat všechny rozhodující charakteristické vlastnosti jako celek a nerozhodovat jen na základě jediného údaje (např. nízké měrné hmoty).

Hliník a jeho slitiny jsou v dostatečné míře užívány ve slévárenství. Slitiny hliníku můžeme odlévat do pískových forem, do kokil nebo pod tlakem. O volbě způsobu lití rozhoduje ekonomie výroby součástí. V průmyslově vyspělých státech se litím do písku vyrábí asi 20 až 30% odlitků z hliníkových slitin, litím do kokil 30 až 50% a litím pod tlakem 20 až 50%. Odlitky ze slitin Al jsou v ČR odlévány ze 4 – 5 % do písku, kolem 50 % gravitačně do kokil a asi 45 % je odléváno tlakově. Výroba odlitků ze slitin Al je uvedena v tabulce č.1.1 [1].

Tlakovým litím proti gravitačnímu lití se získává jemnozrnná struktura odlitku, která vede k lepším mechanickým vlastnostem (pevnost, tvrdost, houževnatost).

Tab. 1-1 Přehled výroby odlitků ze slitin Al litých do pískových forem a gravitačně (kokily) a litých pod tlakem ve vybraných zemích v t/rok

Země	rok	lití do písku a gravitační lití		tlakové lití		celkem
		t/rok	%	t/rok	%	t/rok
Rakousko	2002	47 979	48,43	51 083	51,57	99 062
	2003	49 792	47,69	54 606	52,31	104 398
Německo	2002	286 166	43,51	371 593	56,49	657 759
	2003	297 272	44,09	376 922	55,91	674 194
Itálie	2002	322 000	41,44	455 000	58,56	777 000
	2003	345 000	42,86	460 000	57,14	805 000
Švédsko	2002	10 500	28,3	26 600	71,7	37 100
	2003	10 000	25,64	29 000	74,36	39 000
Maďarsko	2002	26 380	41,61	37 021	58,39	63 401
	2003	27 682	41,43	39 140	58,57	66 822
Polsko	2002	46 050	45,4	55 380	54,6	101 430
	2003	61 040	45,4	73 420	54,6	134 460
ČR	2002	39 664	50,08	32 710	45,2	72 374
	2003	45 144	53,53	32 961	42,2	78 105

Úkolem tlakového lití jsou spojena i řešení diplomové práce, která sleduje vliv tlaku na krystalizaci hliníkových slitin. Jde o specifickou metodu vhodnou pro výrobu velkých sérií rozměrově i hmotnostně menších, tenkostěnných, konstrukčně složitých odlitků, s přesnými rozměry, s velmi hladkými povrchy, dobrými mechanickými vlastnostmi a obvykle nevyžadují žádné dodatečné obrábění, jsou především ze slitin neželezných kovů se střední výškou licích teplot.

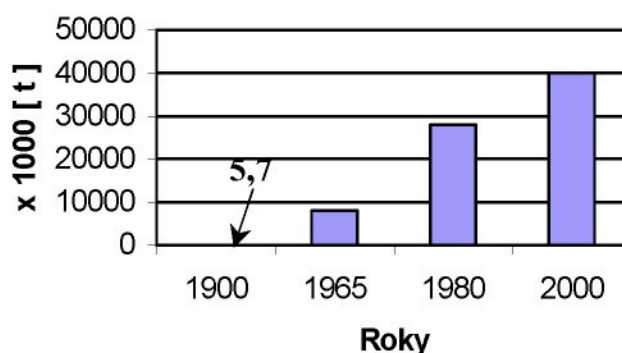
V současné době nastal značný přesun ve výrobě odlitků ve prospěch lití do kokil a zvláště pod tlakem. Je to jednoznačně zřejmé v průmyslu automobilovém, kde celá výroba záleží na tlakovém lití a jen z části na lití do kokil. Lití do písku se zde prakticky nevyskytuje.

2. TEORETICKÁ PRÁCE

2.1 Charakteristika hliníku a hliníkových slitin

2.1.1 Výroba hliníku

Hliník byl objeven koncem 18. století a jeho elektrolytická výroba byla patentována (Heroult, Hall) v roce 1886. Průmyslově se hliník začal vyrábět v roce 1890. V roce 1900 bylo vyrobeno ve světě 5,7 t čistého hliníku. Nárůst jeho výroby je vidět na obr. 2.1.[1].



Obr. 2.1 Nárůst výroby hliníku do roku 2000

Světová výroba po roce 2000 dosáhla přibližně hodnoty 40 milionů tun. Pro jeho výrobu jsou vhodné nerosty na bázi hydroxidu hlinitého (bauxity), u kterých obsah získaného oxidu hlinitého je větší než 40 až 45%. Hliník je možno vyrábět i z dalších nerostů, avšak podstatně chudších (nefelin, alunit, kaolín a některé jíly). Vzhledem k velké manipulaci s materiálem by však výroba byla neekonomická.

Oxid hlinitý se redukuje z bauxitu pomocí vodného roztoku hydroxidu sodného, ve kterém se rozpouští ve formě rozpustného hlinitanu sodného (Bayerova metoda). Kovový hliník se pak vyrábí elektrolýzou tohoto oxidu hlinitého. Nečistoty, které jsou v takto připraveném oxidu hlinitém obsaženy, jsou oxid křemičitý, železitý, titaničitý a vápenatý.

Surový hliník je vyráběn elektrolýzou oxidu hlinitého rozpuštěného při teplotě asi 950 °C v kryolitu (fluorid hlinitosodný, Na_3AlF_6). Elektrolyt se skládá z 90% kryolitu a 10% Al_2O_3 . Spotřeba elektrické energie na výrobu jedné tuny hliníku je asi 18 000 kWh, oxidu hlinitého se na 1 t Al spotřebuje 2 t. Surový hliník má čistotu 99,5%. Lze ho dále rafinovat v elektrických rafinačních pecích, které pracují za teplot 750 až 800°C. Elektrolytem je 60% BaCl_2 a 40% kryolitu. Čistý hliník se získává ze slitiny Al a 25 % Cu. Běžně se dosahuje čistoty 99,99% Al. Vysoce čistý hliník Al 99,9999 se pro speciální účely získává pomocí zonálních taveb.

Nečistoty, které se v čistém hliníku vyskytují, jsou intermetalické fáze na bázi železa, křemíku, mědi, manganu, vanadu, titanu a zinku. Do hliníku se dostávají především z oxidu hlinitého, ale i z elektrod, vyzdívek a dalších pomocných materiálů. Například částice nerovnovážných nečistot bohaté na železo mohou být typu Al_6Fe , Al_3Fe nebo $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$ [1].

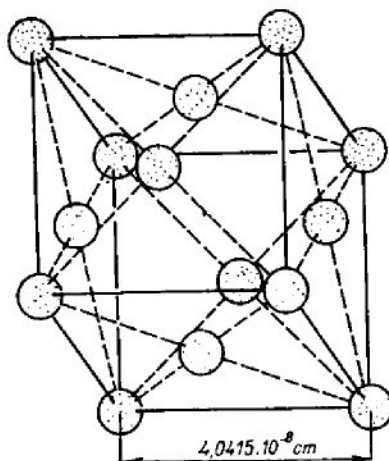
2.1.2 Čistý hliník a vnitřní atomová struktura

Hliník zaujímá v periodické soustavě prvků místo v třetí periodě, v třetím sloupci mezi Mg a Si. Jeho atomové číslo je 13, měrná hmotnost hliníku $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (v roztaveném stavu pouze $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Součinitel tepelné roztažnosti je přibližně $24\cdot 10^{-6}$ v intervalu 20 až 100 °C. Modul pružnosti v tahu je 70 000 MPa. Vrstvy K a L jsou u hliníku atomu nasyceny dvěma, resp. osmi elektrony, ve vrstvě M jsou umístěny 2 elektrony na hladině 3 s a 1 elektron na hladině 3 p [1].

Počet valenčních elektronů je tedy 3, a to je rozhodující pro fyzikální a chemické vlastnosti hliníku. Teplota tavení čistého hliníku je 658 °C. Nad teplotu 658 °C je hliník ve stavu tekutém, kdy jeho atomy jsou prostorově dokonale neuspořádány a jsou v neustálém pohybu. Čím více je překročena teplota tavení, tím jsou pohyby atomů rychlejší. Je tedy rychlost pohybu atomů ve stavu tekutém závislá na množství tepelné energie, která byla kovu dodána.

Zastavením dodávky tepla se snižuje teplota kovu. Při dosažení teploty 658 °C u čistého hliníku dochází ke krystalizaci v krychlové, prostorově středěné mřížce s těsným uspořádáním atomů. Každá elementární buňka je tvořena 14 atomy, z nichž 8 je umístěno v rozích krychle a 6 ve středech ploch. Koordináční číslo je 12, znamená, že každý atom je obklopen 12 nejbližšími sousedními atomy. Délka hrany

elementární buňky hliníku, tj. mřížkový parametr, je $4,041 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ při 20°C . S rostoucí teplotou roste i mřížkový parametr a dosahuje hodnoty asi $4,117 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ při 600°C . Schéma základní buňky je uvedeno na obr. 2.2 [3].



Obr. 2.2 Krychlová elementární prostorově středěná buňka hliníku.

Při teplotách pod 658°C , kdy je čistý hliník ve stavu pevném a jednotlivé atomy jsou vázány na určitou polohu, je vazba mezi nimi, jako u všech kovů, nazývána vazbou kovovou. Podstatou této vazby, vyskytující se u prvků s malým počtem (1 až 3) elektronů ve valenční vrstvě, je snadné uvolňování elektronů, kdy rovnováha mezi kladně nabitými zbytky atomů je udržována množinou odtržených elektronů (elektronovým plynem). Elektronový plyn je nejcharakterističtějším znakem kovových materiálů a jeho pomocí se vysvětluje dobrá elektrická a tepelná vodivost kovů. Elektrická vodivost se podle čistoty pohybuje mezi 38 až $30 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$.

Při nerušené krystalizaci se vytvářejí jako krystalizační zárodky nejčastěji elementární prostorové buňky, ke kterým se připojují další atomy, vytvářející prostorovou mřížku. Atomy zaujmou určitou rovnovážnou polohu. Krystalizace neprobíhá okamžitě, ale vyžaduje určitou dobu. Krystalizací se sníží energie atomů proti stavu úplné neuspořádanosti a rozdíl energie mezi oběma stavy se odevzdá ve formě tepelné energie, která odpovídá hodnotou skupenskému teplu tání, potřebnému k roztavení kovu. U čistého hliníku (Al 99,996%) je toto teplo $94,6 \text{ kcal/kg}$. Na křivce chladnutí nebo ohřevu vzniká vlivem uvolňování nebo spotřeby tepla prodleva, která je tím delší, čím větší je množství tuhajícího nataveného materiálu.

Další prodlevy při stálé teplotě se na křivce chladnutí nebo ohřevu čistého hliníku již nevyskytují, nemění se ani stavba krystalické mřížky v pevném stavu. To znamená, že se u hliníku nevyskytují alotropické přeměny, jak je tomu u jiných technických kovů (Fe, Ti, Mn atd.) [4].

2.1.3 Krystalizace taveniny hliníku

Kovy a slitiny při přechodu z tekutého do tuhého stavu vždy krystalizují, nikdy netuhnou amorfně jako sklo, struska apod. Postup krystalizace je velmi důležitý pro vlastnosti ztuhlého materiálu a schopnost dalšího zpracování.

Ke krystalizaci dochází, klesne-li teplota taveniny pod teplotu bodu tuhnutí, tj. když dojde k určitému podchlazení. Nejprve se musí vytvořit v tavenině jádro tzv. krystalizační zárodek. Je dán hodnotou r_k , která se označuje jako kritický poloměr. Jakákoliv změna jeho velikosti vede buď k dalšímu růstu nebo k jeho rozpuštění. Zárodky podkritické velikosti mají sklon se v tavenině rozpouštět, jsou tedy nestabilní. Zárodky nad kritické velikosti jsou stabilní a jejich další růst je doprovázen již trvalým poklesem volné entalpie soustavy. Kritický rozměr zárodku odpovídá jeho maximu volné entalpie soustavy [6].

Podle způsobu vzniku zárodků se rozlišuje krystalizace vznikem vlastních krystalizačních zárodků, a také že tuhá fáze krystalizuje na cizích zárodcích. První způsob se označuje jako **homogenní krystalizace**, druhý jako **heterogenní krystalizace**. V praktických podmínkách krystalizace kovů a slitin neprobíhá homogenním způsobem. Mechanismus tohoto procesu je však velmi důležitý z hlediska všeobecného pochopení počáteční fáze krystalizace.

2.1.4 Homogenní krystalizace

Homogenní krystalizace může nastat jen vlivem energetických fluktuací (kolísání energie částic), teplotních fluktuací (kolísání teploty) a fázových fluktuací. Pravděpodobnost vzniku energetických fluktuací je tím větší, čím větší je hodnota r_k . Fázové fluktuace jsou periodicky vznikající a zanikající oblasti, ve kterých jsou

atomy uspořádané stejně jako v krystalech. Při určitých hodnotách podchlazení mohou před krystalizační shluky plnit funkci krystalizačních zárodků [6].

Při vzniku nové fáze se celková změna volné entalpie soustavy ΔG_c vyjadřuje vztahem:

$$\Delta G_c = \Delta G_s + \Delta G_v, \quad [\text{kJ}], \quad (1)$$

kde značí: ΔG_c - celková změna volné entalpie [kJ];

ΔG_s - je volná entalpie, potřebná na vytvoření mezi fázového rozhraní zárodek, tavenina [kJ];

ΔG_v - je změna volné entalpie soustavy, při přechodu fáze tekuté ve fázi tuhou [kJ];

$$\Delta G_s = \sigma_{kt} \cdot S, \quad (2)$$

kde značí: σ_{kt} - povrchové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$];

S - plocha fázového rozhraní [m^2];

$$\Delta G_v = V \cdot \frac{\rho}{M} \cdot (G_1 - G_2) = \frac{\Delta G}{V_m} \cdot V, \quad (3)$$

kde značí: ρ - je hustota krystalizační látky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

M - molová hmotnost krystalizující látky [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$];

G_1 - molová volná entalpie tuhé fáze [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$];

G_2 - molová volná entalpie taveniny [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$];

$$V_m = \frac{M}{\rho}, \quad (4)$$

kde značí: V_m - specifický molový objem [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$];

Hodnota ΔG_c při krystalizaci je vždy záporná. Vztah (1) určuje množství energie uvolněné při krystalizaci a je všeobecnou formulací energetického zisku při fázové přeměně. Po dosazení vztahů (2) a (3) do vztahu (1) dostaneme:

$$\Delta G_c = S \cdot \sigma_{kt} - \frac{\Delta G}{V_m} \cdot V \quad [\text{kJ}], \quad (5)$$

Pro zárodek sférického tvaru s poloměrem r [m] platí:

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad [\text{m}^2], \quad (6) \quad V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3, \quad (7)$$

Po dosazení jednotlivých vztahů, vyjádříme výslednou rovnici:

$$\Delta G_c = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma_{kt} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \frac{\Delta G}{V_m}, \quad (8)$$

kde značí: r – poloměr zárodku [m],

Z podmínky maximálního zvýšení entalpie soustavy se vypočítá kritický poloměr zárodku a potřebná práce pro jeho vznik:

$$\frac{\partial G_{c \max}}{\partial r_{kr}} = 0, \quad (9)$$

kde značí: $\partial G_{c \max}$ – parciální derivace maximální celkové změny entalpie;

∂r_{kr} – parciální derivace kritického poloměru zárodku;

$$r_k = 2 \cdot \sigma_{kt} \cdot \frac{V_m}{\Delta G}, \quad (10) \quad A_{kr} = \frac{16}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_{kt}^3 \cdot V_m^2}{\Delta G^2}, \quad (11)$$

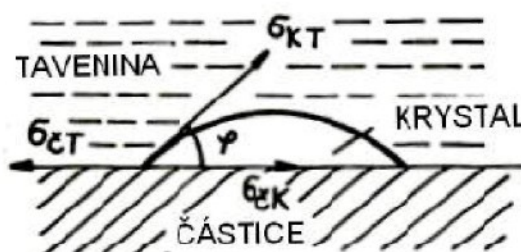
kde značí: r_k – kritický rozměr zárodku [m];

A_{kr} – práce [kJ];

2.1.5 Heterogenní krystalizace

Heterogenní krystalizace nastává v praktických podmínkách a probíhá ve výhodnějších energetických podmínkách, protože v tomto případě zárodek vzniká na

již existujícím povrchovém rozhraní t.j. na povrchu aktivních částic, příměsí, nerozpustných v tavenině. Schéma vzniku zárodku na částici příměsí je znázorněná na obr.2.3 [6].



Obr. 2. 3 Schéma vzniku heterogenního zárodku při splněné podmínce $\sigma_{ct} > \sigma_{ck}$

Na rozhraní částice – tavenina vzniká povrchové napětí σ_{ct} , na rozhraní částice – krystal (zárodek) napětí σ_{ck} a na rozhraní krystal – tavenina napětí σ_{kt} . Změna ΔG_c při vzniku zárodku na částici se vyjadřuje vztahem [6]:

$$\Delta G_c = \pi \cdot r^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot (\sigma_{ck} - \sigma_{ct}) + 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma_{kt} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \frac{\Delta G}{V_m}, \quad (12)$$

kde značí: σ_{ct} – povrchové napětí mezi částicí a taveninou [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$];

σ_{ck} – napětí na rozhraní krystalu a částice [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$];

σ_{kt} – napětí na rozhraní krystalu a taveniny [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$];

φ – úhel smáčení

ΔG_c – celková změna volné entalpie [kJ];

Z uvedeného vztahu vyplývá, že zárodek může vzniknout na částici jen v případě, že $\sigma_{ck} < \sigma_{ct}$. Řešením vztahu (7) vycházíme z podmínky, pomocí níž vypočítáme rozměr zárodku a práce potřebné na jeho vznik [6]:

Podmínka: $\frac{\partial G_{c \max}}{\partial r} = 0,$

$$\text{Rozměr zárodku: } r_{kr}' = \frac{2 \cdot \sigma_{kt} \cdot \sin \varphi}{\Delta G} \cdot V_m, \quad (13)$$

kde značí: r_{kr}' - kritický rozměr zárodku [m];

$$\text{Práce: } A'_{kr} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \sigma_{kt}^3 \cdot (2 - 3 \cos \varphi + \cos^3 \varphi) \cdot \frac{V_m^2}{\Delta G^2}, \quad (14)$$

kde značí: A'_{kr} - práce [kJ];

Z uvedených vztahů vyplývá, že čím menší je úhel φ , viz obr.6, tím menší je povrchová energie na rozhraní tavenina – částice, a tím výhodnější jsou energetické poměry pro krystalizaci. Za aktivní částice nerozpustných příměsí se obvykle považují ty, jejichž parametry mřížky se odlišují od parametrů mřížky krystalizující slitiny o max. 15 až 17%.

Ze zárodku pak roste krystal ve všech směrech. Průběh krystalizace je tedy závislý na krystalizační schopnosti tvoření krystalizačních zárodků a na krystalizační rychlosti (lineární) růstu krystalu z vytvořeného jádra.

Pro vznik jednotlivých krystalizačních zárodků jsou vhodná místa styku se stěnami kokil a krystalizátoru, kde dochází k podchlazení taveniny.

Na tvoření zárodků má vliv především rychlost ochlazování a velikost tlaku. Čím je tlak vyšší, tím vzniká větší počet zárodků. Při pomalém ochlazování se tvoří malý počet zárodků, vzniká tedy málo krystalů, které rostou do velkých rozměrů (struktura hrubozrnná). Naproti tomu při rychlém ochlazování je počet zárodků velký a vzniká mnoho drobných krystalů (struktura jemnozrnná). Některé slitiny i kovy, jako je zinek, antimon apod., mají však tak nepříznivé poměry, že ani velmi rychlým ochlazením nelze u nich dosáhnout jemné krystalizace. Vznik zárodků je podporován také přítomností drobných částic cizích těles v tavenině, např. oxidů, karbidů, intermetalických fází, nebo přímo očkovacích přísad, jako je titan pro hliník apod. [6].

2.1.6 Růst krystalu

Růst krystalů z krystalizačních center je ovlivněn směrem odvodu tepla. Přednostní růst v určitých krystalografických směrech je základem vzniku tzv. dendritické struktury viz obr.2.4,2.5 [3].



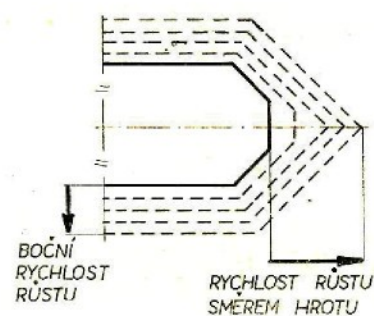
obr. 2.4. Typická struktura s dentritem
vysokovětveným, zvětšení 80x



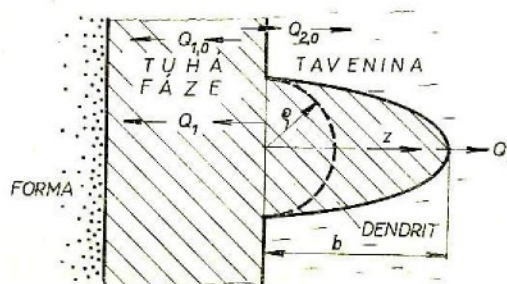
obr. 2.5. Typická struktura
odlitku ztuhlého při tlaku 50 MPa,
zvětšení 80x

Při růstu dendritu, vyčnívajícího od povrchu odlitku kolmo do taveniny, je nutno brát v úvahu, že rychlost růstu jednotlivých krystalických ploch závisí na hustotě uspořádání atomů v příslušných rovinách. Rozdílná rychlost růstu jednotlivých ploch krystalu způsobuje, že zůstanou zachovány jen plochy rostoucí pomaleji a současně se vytváří hrot, pronikající do zbylé taveniny obr.8. Uvolňující se latentní teplo takto rostoucího krystalu ztěžuje podmínky pro růst krystalů v jeho okolí.

Dendrit vyrůstá na fázovém rozhraní a lze si ho v počátku představit jako půlkulovitý výstupek obr.2.6, 2.7



obr. 2.6. Rozdílná rychlost růstu jednotlivých
ploch krystalů



obr. 2.7. Teoretický rozbor počátku růstu
dendritů

Uvážíme-li, že jeho růst probíhá ve směru osy z , můžeme vzrostlý dendrit považovat za rotační elipsoid o průměru $2p$ s velkou poloosou b . Pro růst dendritu

tohoto tvaru je nutné, aby poměr tepla odvedeného z povrchu výstupku a hladkého mezifázového rozhraní byl větší než 1[9]:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_{1,0} + Q_{2,0}} > 1, \quad (15)$$

kde značí: Q_1 – množství tepla odvedeného z výstupku (dendritu) tuhou fází;
 Q_2 – množství tepla odvedeného z výstupku taveninou;
 $Q_{1,0}$ – množství tepla odvedeného od ploché krystalizační fronty tuhou;
fází
 $Q_{2,0}$ – množství tepla odvedeného od ploché krystalizační fronty
taveninou;

U kubické soustavy narůstá krystal rychleji ve směru tří hlavních os a prostor mezi těmito osami se vyplňuje kovem později. U slitin hliníku roste délka sloupovitých krystalů se zmenšováním intervalů tuhnutí slitiny.

Dendritická krystalizace je zdrojem nehomogenního chemického složení. Vlivem této nerovnoměrnosti dochází pak u některých slitin k praskání za vyšších teplot tím, že se v oblastech obohacených přísadami vylučují fáze křehké za vyšších teplot.

Při stěně kokily, kde je velmi vysoké podchlazení a vzniká mnoho krystalizačních zárodků, se tvoří tenká vrstva jemných, obvykle rovnoosých krystalů. Z této vrstvy teprve vyrůstají sloupkovité krystaly. Ztuhlá vrstva kovu mírní intenzitu chlazení, takže v další, střední oblasti ingotu vznikají většinou rovnoosé krystaly.

Při tuhnutí dochází k prudké změně rozpustnosti plynu v kovu. Pro únik plynů během tuhnutí jsou nejpříznivější podmínky při svislém lití, při kterém směr tuhnutí je zdola nahoru.

Téměř u všech kovů dochází při tuhnutí k smršťování, to je zmenšování rozměrů odlitku vzhledem ke kokile nebo krystalizátoru. Smrštění při tuhnutí mívá za následek vznik mikropórů, staženin a vnitřních pnutí. Mikroporovitost je nejčastější u materiálů tvořících dendrity. Při tuhnutí mohou totiž větve narůstajících dendritů uzavřít zbylou taveninu s nízkým bodem tuhnutí, a tím znemožnit krytí objemových ztrát při jejím tuhnutí okolní taveninou – následek je vznik ředin.

2.2 Metody tlakového lití

2.2.1 Tlakové lití a jeho význam pro výrobu odlitků

Technologie tlakového lití charakterizuje náhradu gravitačního metalostatického tlaku silovým působením lisovacího pístu na taveninu v plnicí komoře. Tato technologie je považována za jeden z nejvyšších technologických stupňů lití do kovových forem pro tvarově náročné a tenkostěnné odlitky s vysokou rozměrovou přesností a kvalitním povrchem. Tato skutečnost spolu s možností automatizace a robotizace procesu lití vede k tomu, že tlakové lití zaujímá v současnosti rozhodující postavení při výrobě hliníkových odlitků.

Tavenina pro lití pod tlakem se připravuje z nového materiálu v houskách ke kterému se přidávají odpady ze slévárny a čistírný tzv.vratný materiál. Nejvhodnější je natavit materiál v tavící peci a přelit do udržovací pece. V menších slévárnách se však taví též přímo v udržovací peci nebo se používá dvoukomorových udržovacích pecí. Do první komory těchto pecí se přidávají materiály v tuhém stavu, z druhé komory se roztavený materiál odlévá. Lící teploty jsou pro slitiny (Al-Si) v rozmezí 680 °C až 720 °C. Pro slitiny (Al-Mg) 580 až 620 °C. Vhodná teplota forem při lití slitin hliníku je 200 až 250 °C. Při lití slitin hliníku se obvykle používá tlaku 20 až 600 MPa. Rychlost kovu v závěru se volí podle šířky stěn odlitku. Pro odlitky s tloušťkou stěn 3 mm je rychlost 30 až 50 m.s⁻¹. Pro odlitky s větší šířkou stěn se volí rychlost menší do 5 m.s⁻¹ [4].

Na jakost odlitku má značný vliv rychlost plnění forem a měrný tlak působící na kov při lití. V poslední době se ukázalo, že hlavní nevýhodou technologie lití pod tlakem je pórovitost a nerovnoměrná struktura odlitků. Analýzou sledování těchto problémů se zjistilo, že hlavní příčinou výskytu pórovitosti a nerovnoměrné struktury v objemu odlitku je vysoká rychlost proudění taveniny a způsob vyvození a působení tlaku na taveninu v dutině formy. Vysoké rychlosti proudění taveniny způsobují turbulentní nebo disperzní charakter plnění dutiny formy se strháváním a uzavíráním plynů v odlitku. Doba tuhnutí odlitku pod tlakem, která je limitována tuhnutím taveniny je velmi krátká, řádově milisekundy, a důsledkem je, že odlitek tuhne prakticky bez působení tlaku. Těmto komplikacím lze předejít snížením obsahu plynu v dutině formy např. tlakovým litím do vakuové formy. Podstata těchto

způsobů lití spočívá hlavně v snížení rychlosti plnění formy taveninou a eliminující výskyt plynů v dutině formy před odléváním.

Snaha zvýšit užitek vlastností odlitku pomocí tlakového lití vedla v poslední době k aplikaci lití s tuhnutím pod tlakem, jak je ve světě známo pod označením squeeze casting.

2.2.2 Rozdělení strojů pro tlakové lití

Podle toho, zda je roztavený kov v trvalém či přechodném styku s ústrojím, ve kterém se na kov působí tlakem, rozeznáváme:

- stroje se studenou komorou
- stroje s teplou komorou

Stroje se studenou komorou dále rozděluje podle uspořádání plnicího (lisovacího) mechanismu na:

- ❖ plnicí mechanismus horizontální
- ❖ plnicí mechanismus vertikální

Stroje s teplou komorou:

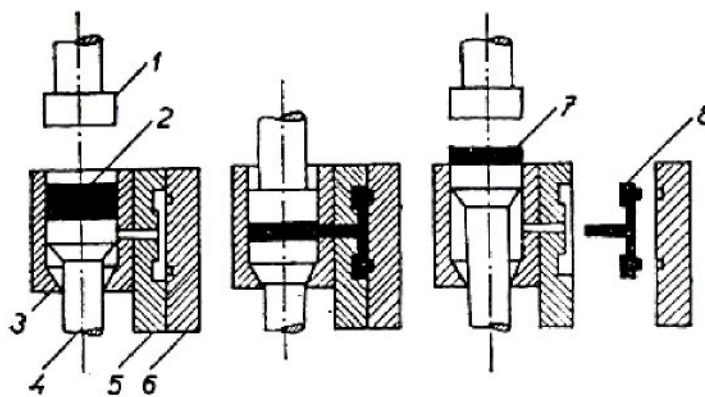
- ❖ lisování kovu pístem
- ❖ lisování kovu působením tlaku vzduchu

Na strojích se studenou komorou odléváme slitiny hliníku, hořčíku, zinku a mědi.

Na strojích s teplou komorou odléváme slitiny cínu, olova a zinku

2.2.3 Tlakové stroje pro odlévání hliníku

Stroje pro lití pod tlakem jsou většinou s hydraulickým pohonem. Vlastní stroj se skládá ze dvou částí. Jedna obstarává uzavírání a otvírání formy a druhá slouží k vstříknutí taveniny do dutiny formy. Podle uspořádání vstřikovacího ustrojí rozeznáváme stroje s teplou a studenou komorou [4].

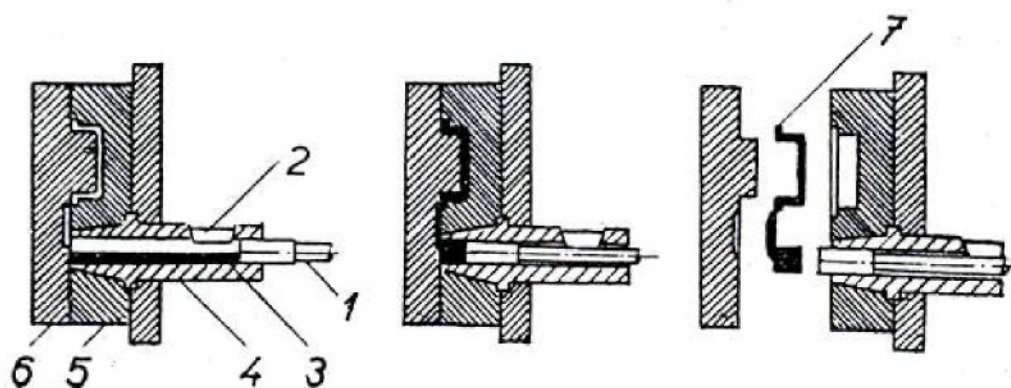


Obr. 2.8. Princip lití kovů pod tlakem se studenou vertikální komorou

1 – vstřikovací (horní) píst, 2 – tavenina, 3 – vertikální studená komora (plnicí válec), 4 – spodní píst, 5 – nehybná polovina formy, 6 – pohyblivá polovina formy, 7 – zbytek z komory, 8 – surový odlitek

Slitiny hliníku se odlévají pouze na strojích se studenou tlakovou komorou. Tavenina udržovací pece se dopravuje do komory ručně lžící nebo dávkovačem. Tlaková komora je vertikální nebo horizontální.

Studená vertikální komora, viz obr.2.8 je tvořena plnicím válcem, do něhož se vlévá tavenina. Dnem plnicího válce je spodní píst, jenž je pohyblivý. Při dosednutí vstřikovacího pístu na kov otevře spodní píst otvor trysky a kov je vysokým tlakem vstříknut do formy. Po dokončení vstřiku vyjede vstřikovací píst nahoru. Spodní píst ustříhne zbytek kovu v plnicím válci od vtoku. Svým dalším pohybem jej vysune z plnicího válce.



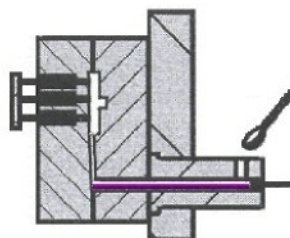
Obr. 2.9. Princip lití kovů pod tlakem se studenou horizontální komorou

1 – píst, 2 – otvor pro nalévání kovu, 3 – tavenina, 4 – horizontální studená komora, 5 – nehybná polovina formy, 6 – pohyblivá polovina formy, 7 – surový odlitek

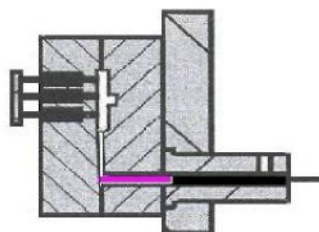
U strojů s horizontální komorou, viz obr.2.9 se tavenina vlévá do plnicího válce otvorem. V komoře ve válci se pohybuje vstřikovací píst. Při pohybu pístu dopředu je kov vtlačován do dutiny formy, po ukončení plnění formy se forma začne otevírat. Při automatizaci lití je třeba řešit hlavně odebírání odlitků z formy, čištění formy, mazání pohyblivých částí formy a plnění komory příslušnou dávkou tekutého materiálu. K plnění komory se používá dávkovačů různých typů, např. takových, u kterých je kov vytlačován do lící komory přetlakem vzduchu. Nejnověji se používá k plnění forem vakua. Trubkou, kterou je komora spojena s taveninou v udržovací peci, se pak kov pomocí podtlaku nasaje do tlakové komory [4].

2.2.4 Pracovní cyklus tlakového stroje

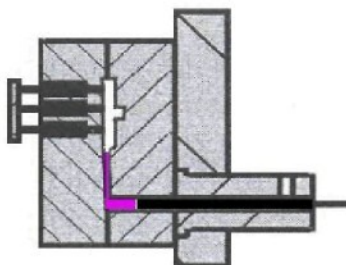
1. ETAPA - Naplnění plnicí komory stroje potřebným množstvím tekutého kovu. Tlak na kov ještě nepůsobí.



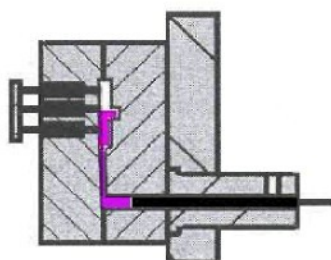
2. ETAPA - Píst uzavře otvor pomocí kterého se plní plnicí komora. Rychlost v_1 pohybu pístu je malá, hodnota tlaku p_1 je rovněž malá, protože se překonává pouze odpor tření v plnicí komoře.



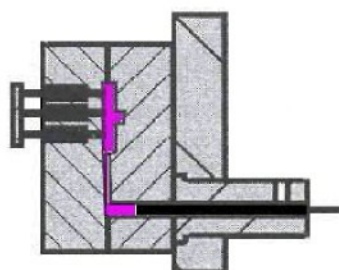
3. ETAPA - Plnicí komora se naplní až po vtokové zářezy. Rychlost pístu se zvyšuje, tlak p_2 je větší než p_1 o hodnotu potřebnou na překonání odporů.



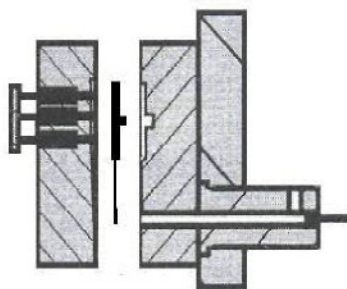
4. ETAPA - Vtoková soustava a dutina formy se plní tekutým kovem. Zvýšení rychlosti pístu na v_2 dochází v okamžiku vstupu taveniny do zářezu, zvyšuje se tlak na p_3 .



5. ETAPA - V další fázi, po úplném vyplnění dutiny formy kovem nastává tuhnutí odlitku za působení dotlaku vyvolaného pístem.



6. ETAPA - Otevření formy a vyjmutí odlitku z pohyblivé části formy pomocí vyhazovacího zařízení



2.2.5 Výhody a nevýhody tlakového liti

Výhody tlakového liti:

- Rychlá výroba
- Možnost výroby v úzkých tolerancích, v některých případech se nemusí již dále obrábět
- Hladký povrch odlitků
- Snadné dosažení požadovaných rozměrů předlitých otvorů (není třeba jader)
- Možnost výroby součástí složitých tvarů
- Možnost výroby tenkostěnných odlitků (0,8- 4 mm)
- Mimořádně nízké náklady na mzdu za jeden odlitek
- Minimální odpad (vtoková soustava jako vratný materiál)
- Snadné pokovování
- Větší pevnost než u odlitků zhotovených jinou technologií

Nevýhody tlakového liti:

- Velké náklady na výrobu formy (až 1/3 ceny celého liciho zařízení)
- Možnosti odlévání jen některých kovů
- Odlitky jsou vždy do určité míry pórovité (pórovitost roste s tloušťkou stěny)
- Maximální velikost odlitku je omezená velikostí liciho stroje

2.2.6 Charakteristika odlitků litých pod tlakem

Formy jsou vyráběny z legovaných ocelí. Konstrukci forem je nutno věnovat velkou pozornost, jelikož má zásadní vliv na jakost odlitku a produktivitu výroby. Současně je nutno věnovat i velkou pozornost konstrukci a výrobě forem pro vysokotlaké lití. Vhodnou konstrukcí a volbou materiálů jednotlivých segmentů dutiny forem lze v některých případech využít i jejich trvanlivost na 120 000 cyklů odlití. S tím také úzce souvisí temperační režim formy a volba správného postříku líc formy.

Odlitky lité pod tlakem mají mít stejnoměrnou tloušťku stěn, nejlépe 2 až 3 mm. Velké souvislé plochy je třeba opatřit žebry. Na odlitku nemají být tepelné uzly způsobené nahromaděním materiálu. Odlitky mají mít zaoblené tvary, např. u hřbetů žeber apod., a mají mít jednoduchý tvar, aby počet pohyblivých částí forem byl co nejmenší. Důležitá je správná volba úkosů asi 2°. Při konstrukci odlitků je dále nutno pamatovat na možnost umístění dostatečného počtu vyhazováků, jimiž se vysune odlitek z pohyblivé části formy. Po vyhazovacích zůstávají na odlitku stopy.

Obrábění odlitků litých pod tlakem se volí jen tehdy, jde-li o dodržení úzkých tolerancí a hladkosti funkční plochy.

Moderní lící stroje jsou drahé a pracují hospodárně jen v těch případech, kdy se využije jejich vysoké produktivity.

2.3 Tavicí agregáty

V úvodu kapitoly je vhodné definovat požadavky na tavicí agregáty pro tavení hliníku a jeho slitin. Množství potřebného tepla je dáno teplotou přehřátí, teplotní závislostí průběhu měrného tepelného obsahu v tuhém a kapalném skupenství a hodnotou latentního tepla tání jednotlivých prvků, které vytvářejí danou slitinu. Celkové teoretické množství tepla je dáno plochou pod uvedenými veličinami pro každý prvek, který je legující komponentou tavené slitiny. Maximální teplota přehřátí hliníku a jeho slitin by neměla překročit 800 °C. Tavení má probíhat intenzivně, s maximální energetickou účinností použitého tavicího agregátu a minimálními ztrátami energie do okolí. Zdrojem energie pro tavení kovů a slitin je

elektrická energie nebo spalování pevných, kapalných nebo plyných paliv. Rozlišujeme tedy pece elektrické a pece palivové. Třetí samostatnou skupinu mohou tvořit pece, které využívají jiný typ energie. Elektrické pece poskytují čistý, dobře regulovatelný typ energie, mají vysokou energetickou účinnost. Elektrické obloukové pece k přenosu elektrické energie na vsázku využívají princip náhřevu přímým nebo nepřímým obloukem, u odporových elektrických pecí s topnými elementy se teplo předává sáláním nebo prouděním buď přímo na vsázku nebo nepřímo na tavící kelímky. Elektrické indukční pece využívají k přenosu energie princip elektromagnetické indukce. Z hlediska konstrukčního provedení můžeme pece rozdělit na :

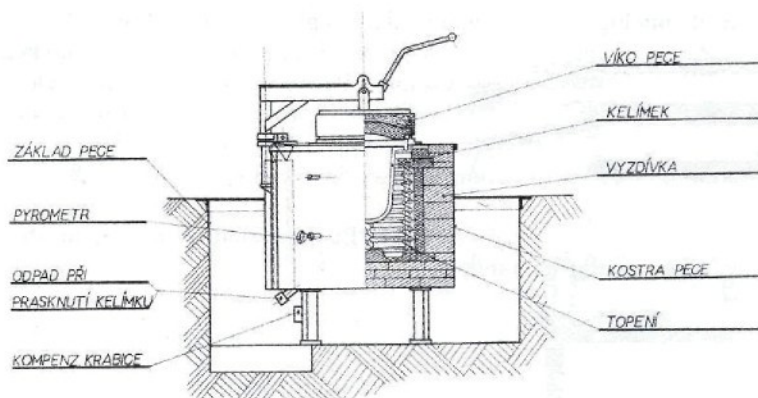
1. kelímkové
2. bubnové
3. nístějové

Pro menší výkony a objemy se používají pece kelímkové s grafitošamotovými kelímky nebo vanami, které jsou vyhotoveny z žárovevých a žáruvzdorných litin nebo ocelí. Bubnové pece se výhodně používají pro větší množství tavené slitiny, umožňují rotaci pece kolem horizontální osy, při které dochází k vyrovnání teplot a také chemického složení natavené vsázky. Nístějové pece elektrické jsou konstruovány pro udržování většího množství jednoho typu slitiny. Nístějové pece palivové se využívají pro natavení velkého množství slitin. Jde o pece s nejvyšším hodinovým výkonem i za cenu nižší kvality taveniny v porovnání s pecemi elektrickými (vyšší nevratné ztráty, vyšší obsahy vodíku). Instalace tavících agregátů je vždy náročnou finanční investicí a o optimálním výběru rozhodují požadavky slévárenského provozu. Významnou roli mají také reálné ceny energií a jejich potřeba pro roztavení stejného množství slitiny na stejnou teplotu přehřátí. Tavící agregáty by měly být využívány v režimu nepřetržitého tavení, což v řadě případů neumožňuje nenaplněnost kapacity slévárny, ale také omezování dodávek zejména elektrické energie.

2.3.1 Charakteristika a druhy elektrických tavicích agregátů

Elektrické pece odporové kelímkové

Používají se pro tavení slitin hliníku a také převážně pro udržování určitého objemu taveniny na konstantní požadované teplotě. Jsou často instalovány jako součást pracovišť gravitačního lití do kovových forem, nízkotlakého lití, tlakového lití, tavicí a udržovací pece ve slévárnách přesného lití. Pro tavení nejsou optimálním typem pecí, protože tavení probíhá pomalu, hodinový výkon je nízký, odporový ohřev je provozně jistý do teplot okolo 1 000 °C. Výhodou je dobrá regulovatelnost, celková čistota jejich provozu. K tavení lze používat kelímky grafitošamotové i z SiC, ale také kelímky nebo vany kovové z žárovevných a žáruvzdorných slitin na bázi železa. Vnitřní povrch kovových kelímků nebo van musí být chráněn keramickou vyzdívkou k zamezení přímého styku roztavených slitin hliníku s kovovým povrchem kelímku. Železo při vysokých teplotách reaguje s hliníkem a jeho slitinami, částečně se rozpouští a vytváří fáze bohaté na železo, které se označují jako fáze α , fáze β a také fáze FeAl_3 , které se vylučují v kostrovitých nebo jehlicovitých útvarech a morfologií svého vyloučení i svými vlastnostmi působí velmi negativně na plastické vlastnosti hliníku a jeho slitin. Typ těchto pecí je na obrázku č.2.10 [5].



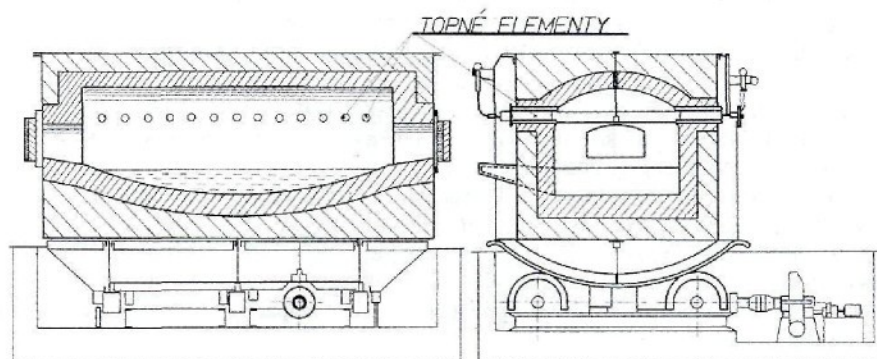
Obr.2.10. Schéma elektrické odporové kelímkové pece s kovovým kelímkem

Elektrické pece odporové bubnové

Konstrukčně výhody spočívají v možnosti naklápění nebo dokonce otáčení okolo horizontální osy, natavení většího množství kovu jednorázově jako jednu tavbu, pochod tavení však probíhá velmi pomalu, náhřev probíhá především sáláním, odporový topný element ve tvaru tyče z grafitu může být mechanicky poškozen, takže se tento typ pecí v provozních podmínkách sléváren neuplatnil.

Elektrické pece odporové nístějové

Uplatňují se ve slévárnách jako udržovací pece pro velké hmotnosti natavených slitin. Je obvyklé, že pro každou tavenou a odlévanou slitinu je instalována jedna pec, ve které se udržuje tavenina na konstantní teplotě v celém objemu a ve které také dochází k vyrovnaní chemického složení slitiny. Topné elementy mohou být zhotoveny z karbidu křemíku (sility) nebo jiných nekovových materiálů s velkým elektrickým odporem, ale také z drátů, pásů, tyčí z žárovevých a žáruvzdorných slitin. Topné elementy jsou umístěny ve stropu nebo ve stěnách vnitřního tavícího prostoru pece mohou být chráněny před poškozením jejich uložením v trubicích opět zhotovených z žáruvzdorných materiálů. Toto řešení se uplatňuje také u pecí pro zařízení nízkotlakého lití. Pro názornost je schematický řez tohoto typu pece zachycen na obrázku č.2.11 [5].



Obr.2.11. Schématický řez elektrickou odporovou nístějovou pecí

Elektrické pece indukční kelímkové

Jsou velmi často instalovaným tavicím zařízením ve slévárnách slitin neželezných kovů. Vyrábějí se jako typicky kelímkové pece s indukční cívkou a obvykle s využitím elektrického proudu se střední nebo vysokou frekvencí a také jako kanálkové, bubnové či nístějové pece nízkofrekvenční s frekvencí elektrického proudu 50 Hz. Princip předávání energie na vsázku je založen na jevu elektromagnetické indukce. Nízkofrekvenční kanálkové pece pracují na principu transformátoru. Pec je vybavena cívkou s jádrem z transformátorových plechů, jako je tomu u transformátoru, primární vinutí cívky je tvořeno měděným vinutím, transformátorem prochází kanálek tekutého kovu nebo slitiny, který tvoří jeden závit sekundárního vinutí. Orientace kanálku je volena tak, aby tavenina v kanálku byla součástí roztavené vsázky v tavicí peci. Pece tohoto typu obvykle pracují nepřetržitě, sekundární okruh tvořený souvislou taveninou v kanálku nesmí být porušen.

Technicky i ekologicky nejvýhodnější je tavení v elektrických indukčních pecích kelímkových s využitím elektrického proudu střední nebo vysoké frekvence. Zdrojem energie je mechanický nebo statický generátor elektrického proudu se střední nebo vysokou frekvencí. Takto upravený elektrický proud se vede do měděné cívky, vodou chlazené, která tvoří vnější obal tavicího kelímku. Cívka ve svém okolí vytváří elektromagnetické pole, které proniká do vnějších vrstev vsázky uložené ve vydusaném tavicím kelímku. Vlivem elektromagnetického pole dochází postupně k prohřívání vsázky až do jejího úplného roztavení.

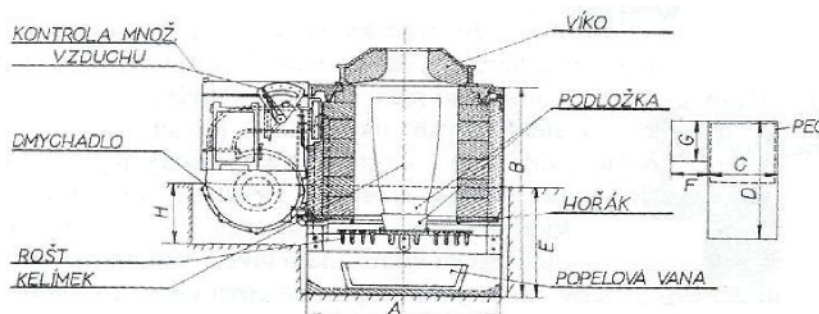
Kompletní instalace těchto pecí má část typického elektrotechnického zařízení a část vlastního tavicího zařízení s kelímkou. Tavicí část má obvykle dva nebo i tři samostatné tavicí kelímky v prostoru tavírny slévárny při instalaci jednoho elektrického zdroje.

2.3.2 Charakteristika a druhy palivových tavicích agregátů

Palivové pece kelímkové

Představují jedno z nestarších řešení tavení slitin neželezných kovů. Jako paliva lze použít pevné palivo (koks), kapalné palivo (nafta, lehký topný olej, mazut) a

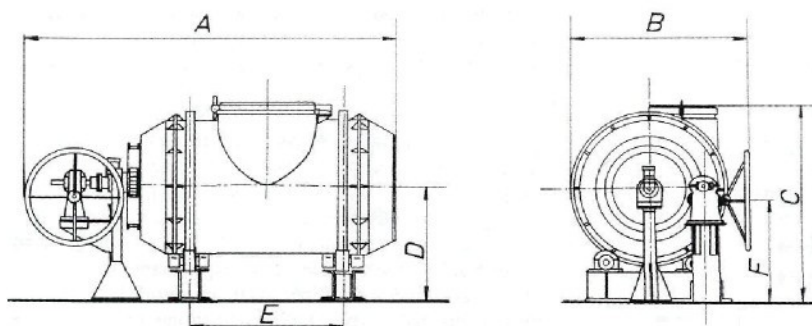
plynná paliva (dnes zemní plyn). Jde o nejjednodušší metodu tavení realizovatelnou s nejnižšími investičními a provozními náklady. Lze tavit kovy a slitiny do teploty přehřátí cca 1200 °C. Velkou nevýhodou je nízká energetická účinnost a styk taveniny s atmosférou tavící pece. I přes tyto nedostatky se pece tohoto typu často ve slévárnách vyskytují. Pro názornost je na obr.č.2.12 schématicky zachycena konstrukce palivové kelímkové pece na tuhá paliva (koks) včetně ventilátoru pro spalovací vzduch [5].



Obr.2.12. Palivová pec na tuhá paliva

Palivové pece bubnové

Používají se v případech jednorázové potřeby většího množství roztavené slitiny. Celá pec, viz obr.2.13 se může naklápět případně i otáčet okolo horizontální osy. V ose na jedné straně pece je umístěn hořák, na druhé straně odtah spalin. Ohřev probíhá přímým stykem plamene se vsázkou v tuhém nebo tekutém stavu, náhřev vsázky je velmi intenzivní, dochází k přímému styku spalin se vsázkou. Vnější povrch pece je menší než u nístějové pece stejné kapacity, takže ztráty tepla povrchem tavící pece jsou menší [5].



Obr.2.13. Schématické znázornění palivové pece bubnové

Palivové pece nístějové

Ve slévárnách jsou stavěny pro tavení velkých množství slitin hliníku. Každá pec taví pouze jeden druh slitiny. Moderní pece tohoto typu používají tzv. vysokorychlostní impulsní hořáky, obohacování spalovacího vzduchu kyslíkem, rekuperaci nebo regeneraci spalin, tepelnou izolaci vláknitými keramickými materiály. Rozmístění a počet hořáků v pracovním prostoru pece řeší výrobce pece. Nístěj pece vytváří vanu pro taveninu, která na straně sázení vsázky přechází v šikmou plochu pro předeřhřev vsázky, na protější straně je nístěj přizpůsobena k odběru taveniny z pece. Celá tavící pec se může naklápět podle potřeby do všech stran. Odpich může být proveden i na bočních stranách pece. Energetická účinnost tohoto typu pece je ve srovnání s jinými typy tavících agregátů vysoká. Hladina hliníku a jeho slitin není kryta speciálními tavivými, vytváří se hutná souvislá vrstva oxidů, která výrazně omezuje jejich další tvorbu. Ztráty oxidací (propalem) jsou pochopitelně vyšší než u elektrických tavících agregátů. Velmi důležitá je životnost vyzdívky. Její vysoká kvalita pozitivně ovlivňuje kvalitu tavené slitiny. Vyzdívka musí odolávat teplotám okolo 1 000 °C, aniž by došlo k porušení jejich souvislosti.

Kromě fyzikální interakce dochází také k vzájemnému chemickému ovlivňování. Pro vyzdění nístěje nejsou vhodné keramické materiály s vysokým obsahem oxidu křemičitého SiO_2 , protože hliník může oxid křemičitý z vyzdívky redukovat. Velmi vhodné jsou pro tyto účely materiály na bázi Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 , případně chrommagnezit nebo šamot. Ke snížení tepelných ztrát se velmi účinně používají zcela běžné vláknité keramické materiály [5].

2.4 Rafinace a odplyňování slitin hliníku

Pod pojmem rafinace rozumíme čištění taveniny, ošetřením pak provedení technologických operací, které mají zajistit co nejvyšší kvalitu roztavené slitiny pro odlévání odlitků.

Prvky a sloučeniny tvořící nečistoty v hliníku, které mají podstatný vliv na kvalitu výsledného produktu, se odstraňují několika způsoby. Kromě rafinace v pecích a pánvích se používají i vysoce účinné kontinuální rafinační procesy, které mají zároveň i malý negativní ekologický dopad [5].

2.4.1 Vznik a povaha nečistot

V roztaveném hliníku se mohou nacházet rozpuštěné plyny a kovy, endogenní a exogenní inkluze, oxidy a další sloučeniny, jako nitridy, karbidy, sulfidy, fosfory a halogenidy, alkalické kovy. V hliníku se z plynů rozpouští prakticky jen vodík, zatímco ostatní plyny jsou ve styku s kovem inertní nebo tvoří nerozpustné sloučeniny. Například kyslík tvoří oxidy Al_2O_3 , SiO_2 , dusík je inertní, nebo tvoří s hliníkem malé množství nitridu AlN . Oxid uhelnatý nebo uhlovodíky mohou tvořit karbidy např. Al_4C_3 , SiC . Většina nečistot se do hliníku dostane z okolní atmosféry nedostatečně vysušených nástrojů, z elektrolytu, z tavení šrotu, z legujících přísad, jako částice z vyzdívek a výdusek, tavících pecí, kelímků, pánví, z použitých taviv a přípravků pro ovlivnění primární lící struktury.

Nečistoty se z taveniny hliníku mohou účinně odstranit různými metodami na základě rozdílných fyzikálních vlastností. V případě nerozpustných inkluzí se aplikuje přímo usazování, vyplavení nebo filtrace. Rozpustné nečistoty se odstraňují probubláváním inertním nebo reaktivním plynem, rafinačními solemi nebo vakuem. Nerozpustné nečistoty se odstraňují filtrací a také pobubláváním plynem. Roztavený hliník se rafinuje probubláváním chemicky inertním nebo reaktivním plynem, nebo reaktivními solemi, eventuálně aplikací vakua a nakonec se filtruje.

2.4.2 Metody rafinace roztaveného hliníku

Ustálení taveniny hliníku

Teplota taveniny klesá v tavících - ustalovacích pecích, což snižuje obsah vodíku v hliníku. Na povrchu taveniny probíhá oxidace některých rozpuštěných kovů, jako Na, Li, Mg, Ca, následkem čehož se snižuje jejich obsah v tavenině. Částice s vyšší hustotou, než má hliník, se mohou usazovat na dně ustalovací pece. Tento proces je relativně krátký 20-30 min za předpokladu, že částice jsou relativně velké, větší než $100\text{ }\mu\text{m}$, ale pro malé inkluze, menší než $50\text{ }\mu\text{m}$, může být doba usazování poměrně dlouhá, což zbytečně prodražuje tuto metodu.

Ustálování nemůže zabezpečit požadovaný stupeň čistoty vzhledem k požadované době procesu. Ustálování je však nepostradatelné po všech operacích v peci, jako míchání, probublávání plynem, zpracování solemi, po kterých vznikají inkluze. Až po tomto kroku dosahuje tavenina prakticky předepsanou teplotu odlévání [5].

Odstraňování vodíku probubláváním plyny

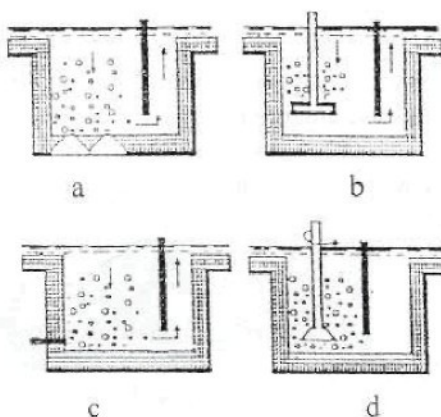
Odplynění taveniny je možné provádět probubláváním roztaveného kovu plynem, přičemž role tohoto plynu spočívá v následujících vlivech na taveninu:

- mezifázové rozhraní kov – plyn se zvětší,
- urychlí se míchání taveniny,
- čistící plyn urychluje odstraňování vodíku.

Za účelem zvětšení mezifázového rozhraní je potřebné zabezpečit dostatečně malé bublinky čistícího plynu. Průměr bublinky je definován Reynoldsovým číslem a zabezpečí se velikostí otvorů v trysce, kterou se plyn dmýchá do taveniny, nebo pórovitostí frity, jestliže se použije pro tyto účely.

Zvýšení objemu použitého plynu má za následek rychlejší odstranění vodíku. Mechanismus odstraňování vodíku se skládá z jeho difuze k probublávajícímu plynu a jeho transportu bublinkami čistícího plynu. Z toho vyplývá, že proces významně závisí na celkovém povrchu bublin a době kontaktu. Pro dmýchání se používají inertní plyny jako Ar a N₂ nebo jiné, např. Cl₂. Rychlost odplynění argonem nebo chlórem je dvojnásobně vyšší než pomocí dusíku. Důvodem je pravděpodobně tvorba nitridů na povrchu bublinek.

Obsah vodíku v odplyněném hliníku dosáhne svou rovnovážnou hodnotu opět za 2 – 4 hodiny, a proto je důležité odplyňovat těsně před odléváním. To je možné realizovat kontinuální rafinací v komorách se systémem dmýchání čistícího plynu [5].



a – pórovité zátky, b – pevný nástavec, c – trysková injektáž, d – rotující nástavec

Obr.2.14. Hlavní typy odplynovacích jednotek

Odstraňování rozpuštěných kovových nečistot

Po ustálení taveniny hliníku se odstraňování rozpuštěných kovových nečistot urychluje účinnějšími metodami zahrnující rafinační plyn. Bublinky tvořené plynem intenzivně zabezpečí promíchání taveniny, čímž se podpoří pohyb materiálu k povrchu, kde může probíhat oxidace a umožní se tím odpaření nečistot z taveniny. Rafinační plyn přímo transportuje jen sodík, zatímco např. lithium může zůstat v tavenině a odchází přes povrch. Při zvýšených teplotách, vzhledem k zvyšujícímu se tlaku par sodíku, se zvyšuje množství sodíku přeneseného bublinami a bublinky mohou být nasyceny sodíkovými párami dokonce i v mělkých vanách.

Tento mechanismus odstraňování nečistot je možné změnit přidavkem chlóru. Alkalie tvoří nerozpustné chloridy, které přímo nebo spojeny s nosným plynem stoupají k povrchu roztaveného hliníku, ze kterého se odstraní v podobě stěr. Nejdříve proběhne reakce chlóru s hliníkem a vytvoří se tak plynný AlCl_3 . Chlorid hlinitý účinně dopravuje chlór k nečistotám. Chlór má také negativní vlastnosti, kromě AlCl_3 se může hydrolýzou tvořit HCl , která ohrožuje zařízení svojí vysokou korozivostí. Proto se chlór přidává do inertních plynů N_2 , Ar jen v potřebných množstvích a v atmosféře se nachází jen v nízkých koncentracích, řádově procentech. V poslední době se zkouší méně hazardní ačkoliv méně účinný plyn SF_6 [5].

Odstraňování inkluzí

Přítomné inkluze v roztaveném hliníku mají různé tvary, rozměry i strukturu. Vliv proplachování plynem na odstranění inkluzí silně závisí na těchto fyzikálních charakteristikách a metodách dmýchání plynu. Inkluze Al_2O_3 , MgO , AlN mohou být přítomné v podobě pórovitého filmu. Je možné je vyplavit na hladinu taveniny, jelikož bubliny plynu se mohou zachytit na jejich povrchu. Pórovité inkluze rozměrů pod $100\text{ }\mu\text{m}$ je možné odstranit z taveniny probubláváním plynem v ustalovací peci. Inkluze o rozměrech $80 - 100\text{ }\mu\text{m}$ a s defektní strukturou lze vyplavit v peci jen jemně rozptýleným plynem přes fritu. Pro vyplavení pórovitých inkluzí o rozměru pod $20\text{ }\mu\text{m}$ je možné použít jen speciální zařízení, umožňující nejefektivnější dispergaci plynu rotujícím nástavcem [5].

Odstraňování inkluzí filtrací

Částice inkluzí se mohou usazovat nebo filtrovat na základě své hustoty a rozměrů. Větší částice než $100\text{ }\mu\text{m}$ a vyšší hustoty než hliník se obvykle dobře usazují, ale částice menšího průměru, $30\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$ lze odstranit jen pomocí vhodného filtračního systému, zabudovaného v odlévacím kanálu [5].

Obecně účinnost filtrování významně klesá s hustotou filtrovaných částic. V případě, že není rozdíl v hustotě částic a taveniny, zachytí se jen ty částice, které se dostanou přímo proti filtru. Z toho vyplývá, že v praktických podmínkách mají dobrou účinnost jen hrubé filtry s malými póry. Také charakteristiky těchto filtrů jsou lepší než keramických pěn nebo pevných filtrů z hlediska odstraňování částic s rozdílnou hustotou vůči roztavenému hliníku.

Typ a pórovitost filtru a rychlost proudění je možné stanovit na základě hustoty a rozsahu velikosti odstraňovaných částic. Z toho také vyplynuly dobré zkušenosti s použitím keramické vlny v odlévacích primárního hliníku. Před odléváním je možnost snížení obsahu sodíku z počáteční hodnoty o $20 - 40\text{ }\%$ [5].

Hlavní výhodou pevného filtru je, že jeho pórovitost je konstantní a že je možné ho připravit ve velmi širokých mezích velikosti póru a tvarů, takže parametry se dají výborně přizpůsobit na speciální podmínky v závislosti na filtrovaných částicích.

Objemy a následně i životnost keramických pěnových filtrů jsou limitované. Vyžadují proto častou obměnu. Povrch filtrů se zanáší velkými částicemi, čím se snižuje jejich životnost, filtrování by se mělo použít až po probublávání taveniny plyny a rafinacemi solemi. Filtry z keramické pěny jsou však značně rozšířené pro lehkou manipulaci a nízkou cenu.

Odstraňování nečistot solnými přísadami

Přísady skládající se z různých anorganických sloučenin se přidávají do taveniny v práškové formě, granulích nebo tabletách manuálně nebo automatizovaně. Přídavek solí je silně závislý na teplotě a požadované chemické reakci a oddělování reakčních produktů probíhá snadněji za vyšších teplot.

Složky solí se kombinují podle účelu jejich použití. Složky těchto přísad mají za úkol:

- tvořit nízkotavitelné vysokotekuté složky NaCl – KCl,
- rozkládat se při provozní teplotě za tvorby anionů (nitráty, karbonáty a sulfáty), které jsou schopné reagovat s nečistotami, přičemž nečistoty, oxidy a jiné sloučeniny, mají hustoty odlišné od taveniny, což umožní jejich oddělení,
- působit jako nosič pro aktivní složky nebo pokrýt taveninu.

Obecně se vhodnost aplikace solných přísadků určuje podle účelu jejich použití, tj. mají-li být použity v tuhém nebo v tekutém stavu, anebo jestli se vyžaduje vysoká reaktivita a kompatibilita s taveninou. Například soli obsahující sodík nejsou vhodné pro slitiny AlMg za účelem odstranění sodíku. Podobně sodíkové krycí soli by se neměly používat pro nadeutektické AlSi slitiny rafinované fosforem, protože sodík tvoří fosfory, čímž se fosfor stává neúčinným při rafinaci [5].

V průmyslové praxi se používá několik typů přísadků jimiž jsou krycí soli, čistící přísavky, struskotvorné přísavky, rafinační strusky, odplynovací přísady, tavidla. Používané množství přísad do tavení se mění v širokém měřítku. Množství krycích a struskotvorných přísad se pohybuje v rozmezí 0,2-0,5 % z celkové hmotnosti vsázky. Množství čistících a rafinačních přísad se určuje podle více faktorů. Nejdůležitější je poměr primárního kovu a šrotu v tavenině a požadovaná kvalita produktu. Složky přísad jsou obvykle hydrofobické, a proto přísady vyžadují uskladnění v suchém

prostředí. Vlhkost, která se dostane do taveniny, může způsobit výbuch ale i vnáší do taveniny vodík. Zároveň se musí brát v úvahu, že při shrabování by mělo co nejméně kovu přecházet do stěr. Tavenina se musí jistý čas ponechat v klidu (od 10 min do 2 hodin), a to v závislosti na své hmotnosti, pro zabezpečení vyplavení zbytkových lehkých částí přísad, smáčených oxidických inkluzí, a pro usazení těžších částí. Vytvořená vrstva stěry se musí opatrně odstranit z povrchu taveniny, aby se zabránilo vnášení solných inkluzí [5].

Vsázkování, lze provádět manuálně a nebo je možné přísady vnášet do koupele tryskou opatřenou nástavcem pro plyn. Tato technologie významně zvyšuje účinnost struskování a ekonomiku spotřeby přísad, přičemž se současně přidávají strukturní modifikátory. Nosný plyn má taktéž čistící efekt.

Vakuová rafinace:

Vzhledem k technickým komplikacím se tato technologie stala populární relativně později. Snižování tlaku přirozeně může ovlivnit proces, protože celkový tlak nad taveninou hraje důležitou roli. Při vakuové rafinaci je možné očekávat následující procesy:

- odstranění rozpuštěných plynů a prchavých složek vlivem snížení parciálního tlaku nad taveninou,
- chemické reakce v závislosti na tlaku,
- vyplavení tuhých nečistot, účinkem vznikajících bublin.

První a třetí proces mají praktický význam vzhledem k odstraňování vodíku a suspendovaných oxidů. Vypaření rozpuštěných kovů přichází v úvahu jen v případě sodíku [5].

Vakuové odstranění vodíku:

Vysoká hodnota metalostatického tlaku v tavenině obvykle brání tvorbě bublin, což naznačuje, že se nečistoty mohou odpařit jen po difúzi k povrchu taveniny. U mechanismu vakuového odstranění vodíku se nejdříve tvoří počáteční bubliny a relativně rychle dochází k odplynění, později je proces kontrolovaný difúzí.

Doba odplynění závisí na době tvorby bubliny a na době vzestupu na hladinu. Rychlost vzestupu závisí na vztlaku a na viskozitě. Bylo určeno, že rychlost vzestupu bublin o průměru 1 až 10 mm je 0,22 až 0,65 m.s⁻¹ [5]. Z toho vyplývá, že doba vzestupu v 0,5 m hluboké tavenině je 1 až 2 s, což naznačuje, že odplynění vlivem bublin probíhá v reálném čase [5].

Podmínky tvorby bublinek nejsou samozřejmě stejné v případě různých slitin. Bublínky se například tvoří v čistém hliníku a v Al-Mg slitinách, ale v Al-Si slitinách se netvoří a odplynění se děje difúzním mechanismem. Difúze je potom bržděna tvorbou oxidické vrstvy na povrchu taveniny.

Určujícím krokem pro rychlost odplynění je difúze vodíku. Proces je možné urychlit intenzivním mícháním taveniny, přičemž metody míchání mohou být důležitým faktorem. Koncentrické pomalé vertikální míchání pohybuje taveninou jen horizontálně. Vertikální pohyb může být vyvolán jen vírem při vysokých otáčkách.

Odplynění se může dále urychlit asymetrickým mícháním, přemístěním vertikálního míchadla ze středové osy nebo umístěním míchadla pod úhlem [5].

2.4.3 Speciální metody rafinace hliníku

Frakční krystalizace

Tento proces je založený na principu, že ztuhlé krystaly a zbylá tavenina mají obvykle rozdílné složení. Jestli ztuhlý krystal obsahuje méně nečistot to znamená, nečistoty se koncentrují v tavenině, tuto metodu je možno aplikovat na rafinaci kovů. Praktické postupy se odlišují v způsobech oddělování tvořených krystalů a zbytkové taveniny. Primární krystaly mohou vznikat na chlazeném povrchu, což se používá na odstranění čistého kovu z taveniny. Jiný způsob je oddělení rozptýlených vytvořených krystalů a jejich usazení v nížeji pece. Nejpraktičtější metodou je kombinace frakční krystalizace a odlévání čepů, kdy je tavenina ohřívána na vrchu krystalizátoru a na jeho spodku ochlazována. Kvůli zabezpečení transportu hmoty v tekuté fázi je tavenina v krystalizátoru promíchávána. Tuhnoucí čep je kontinuálně tažený dolů spodkem krystalizátoru, zatímco nečistoty se koncentrují v tavenině na vrchu krystalizátoru. Na řízení krystalizace lze použít parametry, jako je rychlost tečení a intenzita chlazení. Tímto způsobem se zabezpečí požadovaná čistota

tuhnoucího produktu. Obvykle je možné dosáhnout čistoty v rozmezí 99,96 – 99,99 %, ale to závisí i na čistotě počátečních materiálů [5].

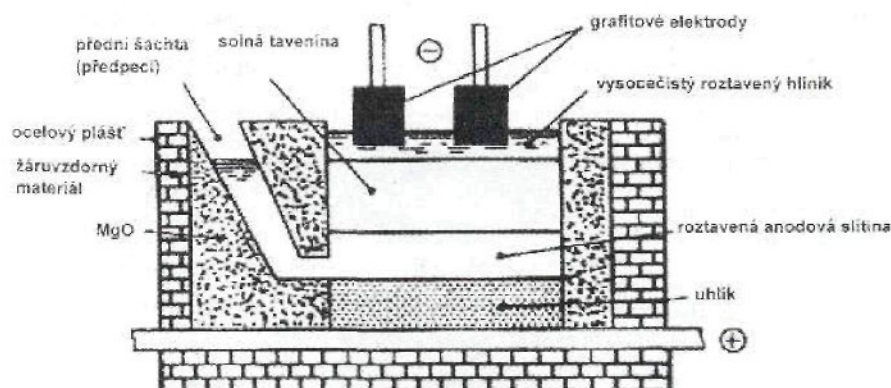
Třivrstvá elektrorefinace

Vysokočistý hliník se může získávat tzv. třivrstvou elektrolýzou v Hoopesově elektrolýzáru. Tento elektrolýzáru na rozdíl od klasického dvouvrstvého Hall-Héroultova elektrolýzáru pracuje s třemi kapalnými vrstvami [5].

V tomto procesu je anodou znečištěný hliník, který tvoří vrstvu na dně elektrolýzáru a do kterého se přidalo přibližně 30 % Cu na zvýšení jeho hustoty na hodnotu 3,4 - 3,7 g.cm⁻³. Měď má významně vyšší elektrodový potenciál, takže se neúčastní anodického procesu, který se skládá z rozpuštění hliníku v elektrolytu. Elektrolyt je tvořený směsí fluoridů a chloridů (20-25 % AlF₃, 15-20 % NaF, 60 % BaCl₂ a NaCl). Hustota roztaveného elektrolytu je řízená tak, aby byla nižší než hustota anodové slitiny, ale vyšší než tavenina čistého katodového hliníku, který z tohoto důvodu tvoří nejvrchnější vrstvu. Roztavený elektrolyt má hustotu 2,7-2,8 g . cm⁻³ a nejvrchnější vrstva vysoko čistého roztaveného hliníku má hustotu 2,3 g . cm⁻³ [5].

Přidávky do elektrolytu se volí tak, aby měly vysoké rozkladné napětí, čili katodovým procesem v zásadě probíhá vylučování čistého hliníku. Proudový kontakt na anodickou vrstvu je zabezpečený grafitovými bloky na dně elektrolýzáru, zatímco do vrstvy čistého katodického hliníku jsou ponořené grafitové tyče, sloužící jako katodový kontakt. Boční stěny elektrolýzáru jsou tvořené žáruvzdorným materiálem na bázi MgO, který je elektrickým izolantem. Elektrolýzáru je zakrytý kvůli prevenci kontaminace hliníkové vrstvy a tepelným ztrátám.

Používané intenzity proudu jsou v rozmezí 20 až 80 kA a proudové hustoty v rozmezí 0,2-0,5 A/cm². Nevýhodou této technologie je relativně vysoká spotřeba elektrické energie (12 – 20 kWh/kg Al). Kvalita kovu se zabezpečuje optimálním nastavením sloupce lázně elektrolytu a bezproblémovým chodem. Třivrstvá elektrolýza v Hoopesově elektrolýzáru je zobrazena na obr.2.15 [5].



Obr.2.15. Schéma třívrstvé elektrorafinace

Zonální rafinace

Základní princip zonální rafinace je stejný jako u frakční krystalizace, ale v tomto případě se primární krystaly nedají od taveniny oddělit. Kovová tyč určená k rafinaci se umístí do křemenné roury, která se buď evakuuje, nebo naplní ochranným inertním plynem Argonem. V rafinované tyči se do průřezu indukčně taví úzká zóna zvenci křemenné roury. Pohybem vinutí podél roury se zóna roztaveného kovu pomalu pohybuje podél tyče. Rychlost pohybu vinutí je 0,5 – 1 mm/min. Důležité je dodržet konstantní šířku roztavené zóny. Jeden krok procesu nezaručí dostatečnou čistotu, ale 10 – 30 průběhů zkoncentruje většinu nečistot na konci rafinované tyče. S ohledem na směr pohybu se nečistoty mohou rozdělit do tří skupin. První skupina se skládá z prvků, které se koncentrují v tekuté fázi, a proto se pohybují ve stejném směru jako roztavená zóna. Nečistoty patřící do druhé skupiny se koncentrují v tuhé fázi, a proto se mohou koncentrovat na libovolném konci tyče. Prvky, jako např. železo, křemík a měď, se koncentrují v tekuté fázi, a tedy na konci hliníkové tyče ve směru pohybu zóny. Po odřezání konců tvoří středová část tyče očištěný produkt, který má hrubě krystalickou strukturu, a proto se musí přetavit ve vysokočistém grafitovém kelímku pod ochranou atmosférou. Pomocí této metody je možno získat prakticky úplně čistý hliník pro speciální aplikace. Samozřejmě, že se vyžaduje předrafinovaný počáteční materiál a produktivita je relativně nízká [5].

2.5 Slévárenské slitiny hliníku

Společným znakem slévárenských slitin je vyšší obsah přísad než u slitin tvářených. Jejich slévateľnost, zlepšující se podílem eutektika ve struktuře, je velmi dobrá a dovoluje odlévat i složité a tenkostěnné odlitky. Ve srovnání se slitinami tvářenými, jsou mechanické vlastnosti slévárenských slitin nižší. Jejich hodnota nezáleží jen na druhu slitiny, ale často velmi výrazně na způsobu odlévání. Setkáváme se obvykle s odléváním do písku, kokily nebo pod tlakem. Takovou rozmanitost slévárenské technologie nenalzáme u žádných jiných slitin, ať již jde o slitiny hořčíku, mědi, či zinku, popř. i slitiny železa. Je to proto, že slitiny hliníku mají některé příznivé vlastnosti, které se vhodně doplňují:

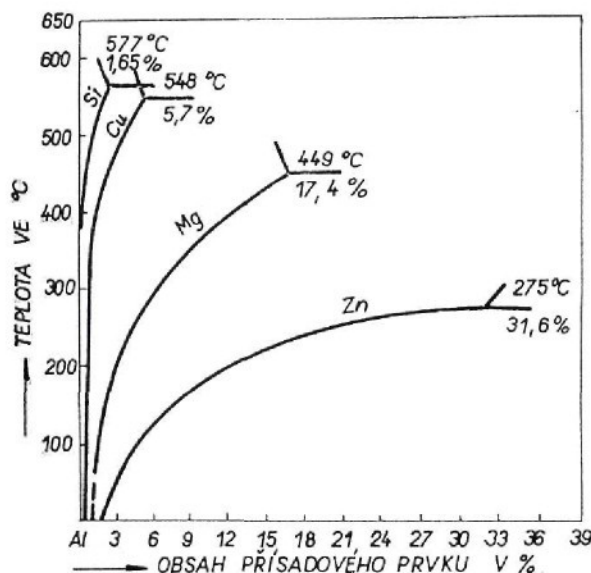
- Mají nízkou teplotu tání a tím také nízkou teplotu liti 680 – 780 °C, což je výhodné z hlediska kovových forem, do nichž jsou odlévány.
- Povrch roztavené slitiny je vždy chráněn slabou vrstvou oxidů.
- Mají vysoké latentní teplo tání přibližně 391 kJ · kg⁻¹.
- Mají malou náchylnost ke vzniku trhlin pod vlivem napětí.

2.5.1 Legování slitin hliníku

Legující prvky zvyšující pevnostní charakteristiky slitin oproti čistému hliníku asi 10x. Vysokopevné slitiny hliníku dosahují pevnosti 450 až 690 MPa. K tomuto enormnímu nárůstu pevnosti dojde následkem omezení plastické neformovatelnosti (omezením mobility dislokací). Plastická neformovatelnost slitin se rovněž sníží v důsledku krystalizace více fází u heterogenních struktur, např. při přítomnosti eutektika, nebo u homogenních struktur po sekundární krystalizaci precipitující fáze. Lze tedy konstatovat, že zpevňující efekty u hliníkových slitin jsou:

- Tvorba substitučních tuhých roztoků (substituční zpevnění).
- Heterogenní krystalizace (krystalizace vícefázových struktur).
- Precipitace sekundárních fází (precipitační zpevnění).
- Plastická deformace za studena (deformační zpevnění).

V prvních třech případech bude hrát hlavní roli schopnost matrice tvořit tuhé roztoky obr.2.16 [1].



Obr.2.16. Omezená rozpustnost hlavních legujících prvků

Schématicky ukazuje rozpustnost jednotlivých hlavních legujících prvků v hliníkové matrici. Obsah těchto prvků v zrnech hliníku se mění podle křivek změny rozpustnosti s teplotou.

Tuhé roztoky, které hliník s legujícími prvky tvoří, jsou tuhé roztoky substituční. Aby takové tuhé roztoky mohly vzniknout, musí být splněny některé podmínky.

- Rozdíl atomových poloměrů hliníku a příměsi nesmí být větší než 15 %.
- Mocenství rozpuštěného kovu musí být stejné jako kovu základního.
- Kovy musí mít podobnou elektronegativitu.
- Krystalická mřížka musí být geometricky podobná.

Čím méně jsou tyto podmínky splněny, tím více je oblast výskytu tuhých roztoků omezena a tím větší je náchylnost slitiny tvořit intermediální sloučeniny.

Legující prvky, které mohou s hliníkem a vzájemně mezi sebou tvořit sekundární sloučeniny a mají relativně malou rozpustnost v tuhém stavu, jsou železo, nikl, titan,

mangan a chrom. Částice tvořené sloučeninami těchto prvků (ale i částice elementárního křemíku, které krystalizují v intervalu tuhnutí) jsou snadno pozorovatelné světelným mikroskopem. Jsou uloženy na hranicích zrn, popřípadě mezi větvemi dendritů.

Tyto intermediální sloučeniny jsou křehké a tvrdé a ve struktuře se většinou vyskytují v poloze (na hranicích dendritů), kde snižují pevnostní vlastnosti nebo zvyšují náchylnost k mezikrystalové korozi. Jejich výskyt je proto nežádoucí a je třeba jej potlačit. Jedná se o binární fáze CuAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 , Ni_2Al_3 , $\text{Cr}_2\text{Al}_{11}$, FeAl , NiAl , Mg_2Al_3 [1].

Ve slitinách obsahující železo a křemík se tvoří zejména částice kvaternární chemické sloučeniny $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}$. Obsahuje-li slitina Cu, dochází ke vzniku ternární fáze $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$. Koncentrace Mn, popřípadě Cr ve slitině po rychlém ochlazení převyšuje rovnovážnou koncentraci. Tuhý roztok je tak přesycený a metastabilní. Precipitace disperzních částic intermetalických sloučenin výše uvedených prvků zabraňují růstu zrn např. při rekrystalizaci. Tyto částice nezpevňují příliš matrici, protože jsou s ní nekoherentní, a současně s jejich vylučováním se matrice ochuzuje o substituční příměsi [1].

Mechanické vlastnosti pozitivně ovlivňují legury, které vedou k možnosti slitiny precipitačně vytvrzovat. Jsou to slitiny AlCuMg , AlMgSi , AlZnMg a AlSiCu [1]. Pod křivkou solidu se u těchto slitin za teploty okolí nebo za zvýšených teplot vylučují fáze Al_2Cu , Mg_2Si , a MgZn_2 [1]. Tyto intermetalické fáze se vylučují v objemu zrna základního tuhého roztoku ve formě jemné disperze a stávají se tak účinnou překážkou pohybu dislokací obr. 2.17 [1].



Obr.2.17. Částice precipitující fáze v základním tuhém roztoku

Slitiny hliníku podle schopnosti tvořit disperzní precipitát můžeme dělit na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné.

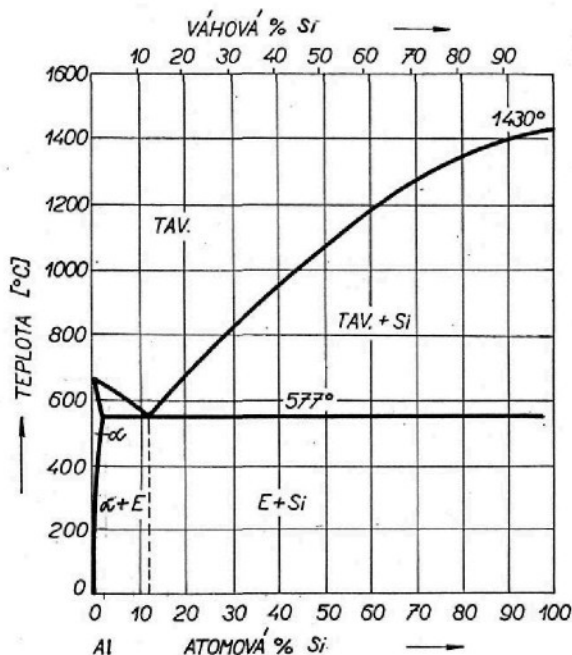
Slévárenské vytvrditelné slitiny jsou AlCuNiMg, AlSiMg, AlSi, AlSiCuNi, AlSiCu, AlMgSi [1].

Nevytvrditelné slévárenské slitiny jsou AlMg5, AlSi10, AlSi13, AlSi5Cu2 a další. Mezi nevytvrditelné slitiny se zařazují téměř veškeré slitiny lité pod tlakem. Nevytvrditelné hliníkové materiály jsou všechny typy technického čistého hliníku a dále slitiny tvářené: AlMg3, AlMg5, AlMg7, AlMgMn, a AlMn [1].

2.5.2 Slitiny hliníku s křemíkem

Slitiny tohoto typu patří k nejdůležitějším slévárenským slitinám hliníku. Jejich název je silumin. Jsou to slitiny s různým obsahem křemíku, podle něhož je možno je rozdělit na slitiny:

- Podeutektické s obsahem (4,5 – 10 %) Si.
- Eutektické s obsahem (10 – 13 %) Si.
- Nadeutektické s vyšším obsahem křemíku obr.2.18 [6].



Obr.2.18. Rovnovážný diagram Al - Si

Slitiny s křemíkem dobře vyplňují dutinu formy, málo se smršťují, mají velmi dobrou zabíhavost a malou náchylnost ke tvoření trhlin za tepla. Obrobitelnost siluminů je poněkud horší. Jejich sklon k zadírání je nepatrný, a proto je možno použít jich jako ložiskové slitiny pro střední namáhání. Tyto vlastnosti mají především slitiny eutektické nebo slitiny ležící blízko eutektického bodu, a proto také patří k nejlepším slitinám pro liti pod tlakem. Dobrá zabíhavost eutektických slitin umožňuje výrobu tenkostěnných tvarově komplikovaných odlitků. U tlustostěnných odlitků v místech materiálových uzlin je nebezpečí tvoření staženin, zvláště při vyšší teplotě liti.

Nadeutektické slitiny se vyznačují zvláště nízkým součinitelem tepelné roztažnosti. Tato vlastnost je výhodná pro odlitky pracující za zvýšených teplot, jako jsou např. písty pro spalovací motory.

Podeutektické slitiny se používají tam, kde záleží na výborné tažnosti a výborné odolnosti proti korozi. Jsou to slitiny, které mají značné rozmezí křemíku. Protože připouští i obsah mědi, patří spíše do skupiny Al – Si- Cu [1].

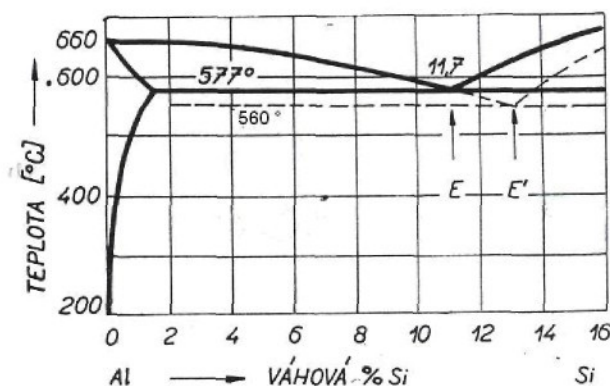
Siluminy jsou v současné době u nás nejrozšířenější slévárenské slitiny hliníku. Jejich výroba je vyšší než 60 % z celkového množství vyráběných slitin.

Modifikace Al – Si

Ve většině případů je nutné siluminy modifikovat sodíkem, tím se zlepši jejich mechanické vlastnosti, především tažnost, mění se však také slévárenské vlastnosti.

Křemík, který společně s hliníkem tvoří eutektikum, má větší krystalizační schopnost než hliník a krystalizuje za menšího přechlazení v podobě dlouhých jehlic. Opožděně krystalizuje hliník, který se zbytkem křemíku tvoří jen v omezeném rozsahu eutektikum. Jehlicovitá struktura křemíku vyvolává křehkost slitiny. Modifikací taveniny lze dosáhnout toho, že se sníží krystalizační schopnost křemíku do takové míry, že současně dochází ke krystalizaci hliníku za značného přechlazení taveniny a vzniká tak velmi jemné eutektikum. Snížení krystalizační schopnosti křemíku souvisí se změnou povrchového napětí na čele rostoucích zárodků křemíku. O převažujícím vlivu povrchového napětí svědčí i to, že vibrace modifikované slitiny ruší účinek přísad a křemík krystalizuje opět v jehlicovité formě.

Při správně provedené modifikaci, např. eutektické slitiny, váže hliník v eutektiku větší množství křemíku, než odpovídá rovnovážnému stavu, a slitina, která byla eutektická, tuhne podle struktury jako podeutektická. Eutektický bod se tedy zdánlivě posunul směrem doprava obr.2.19 [6].



Obr.2.19. Posuv eutektického bodu po očkování

Modifikace siluminů se provádí tak, že se do roztavené slitiny, která je ohřata na určitou teplotu, vpraví stanovené množství sodíku nebo solí, popř. se přidá sodík kombinovaný solemi.

Při praktickém používání sodíku a jeho solí byly zjištěny i následující nevýhody:

- Sodík zvyšuje stupeň naplynění siluminů.
- Slitinu modifikovanou sodíkem není možné odplyňovat, filtrovat apod., protože se tím ztrácí efekt modifikace.
- sodík zvětšuje koeficient objemové smrštivosti v intervalu tuhnutí slitiny, v důsledku čehož se zvyšuje výskyt rozptýlené porózy.

Dále je možné siluminy modifikovat antimonem, kterého stačí přidat 0,2 % a jehož účinek s dobou neklesá, což je největší nevýhoda modifikace sodíkem. Antimonu se používá jen při odlévání slitin hliníku s křemíkem do kokil, při rychlém tuhnutí, ale i tak je modifikace účinná jen u podeutektických slitin.

Stále častěji používaným modifikátorem v podeutektických a eutektických silumínech je stroncium. Jeho modifikační účinek je delší (1 až 2 hod.). Čas

účinnosti stroncia je možné prodloužit až na 10 hodin přísadou 0,05 % až 0,2 % berillia, které snižuje rychlost oxidace taveniny, a tím stabilizuje účinek stroncia. Výhodou stroncia, kromě delšího času účinnosti oproti sodíku, je i menší snížení teploty eutektické přeměny. Stroncium se vsádkuje ve formě předslitiny AlSr_{10} , AlSr_5 , SrCO_3 [10].

Očkování Al – Si

Očkováním se prioritně ovlivňuje počet krystalizačních zárodků, a jeho důsledkem je proto zjemnění struktury.

U slitin Al-Si se využívá očkování na zjemnění kovové matrice, tj. tuhého roztoku alfa přísadami některých přechodných kovů. Do Al – Si slitin se legují přísady, jako je např. fosfor, titan, bor, které jsou do taveniny přidávány jednotlivě nebo kombinovaně. Tyto prvky jsou vnášeny do taveniny ve formě intermetalických sloučenin.

Náchylnost ke tvoření soustředěných staženin, která je obvyklá především u eutektických slitin, je vlivem očkování potlačena a ve slitině nacházíme spíše mikrostaženiny. Je-li překročeno optimální množství očkovací přísady, je slitina přeočkována.

Přeočkování se projeví vznikem plynových bublin o velikosti 0,1 až 2 mm, jejichž vznik však dosud nebyl uspokojivě vysvětlen [6].

Podeutektické siluminy, které jsou lité pod tlakem, obvykle neočkovujeme. Rychlé ochlazení slitiny působí na značné přechlazení obou fází tvořících eutektikum a jejich krystalizace probíhá pak prakticky současně na větším množství krystalizačních zárodků. Tím vzniká jemnozrnné eutektikum. Podobného výsledku lze dosáhnouti přehřátím taveniny před litím. Přehřátí taveniny zbavuje slitinu aktivních zárodků a krystalizace probíhá za většího přechlazení spontánně.

Očkování titanem je málo účinné a dosahuje se při něm nejhorší zjemňující účinek na alfa fázi. Zjemnění tuhého roztoku alfa titanem probíhá tak, že zbytky intermetalické fáze TiAl_3 , které nejsou úplně rozpuštěné po vnesení předslitiny typu AlTi do taveniny, působí jako krystalizační zárodky [10]. V této souvislosti se projevuje výrazný vliv teploty očkování a doby výdrže na této teplotě. Čím je vyšší

teplota očkování a delší doba výdrže, tím více částic intermetalické fáze TiAl_3 se rozpustí a efekt očkování je nižší [10].

Očkování borem je nejúčinnější a dosahuje se při něm nejlepší zjemňující účinek na alfa fázi. Zjemnění tuhého roztoku alfa borem probíhá tak, že částice intermetalické fáze AlB_2 působí jako krystalizační zárodky. Fáze AlB_2 je vnášena do taveniny ve formě předslitin typu AlB. Výška teploty očkování a doby výdrže na této teplotě nemá výrazný vliv na zjemňující účinek, protože částice AlB_2 vznikají při primární krystalizaci, takže není podstatné, zda se rozpustí všechny částice AlB_2 vnesené předslitinou nebo ne.

Slitiny Al – Si – Cu

Tato slitina se užívá v hojném množství, a to zejména jako slitina druhého tavení. Pravidlem je, že obsah křemíku je vždy větší než obsah mědi. Odolnost proti korozi je u těchto slitin značně menší, zejména jde-li o slitiny druhého tavení s větším obsahem nečistot. Zvýšený obsah železa lze u těchto slitin kompenzovat obsahem manganu, jenž by měl být v rozmezí 0,3 – 0,6 %. [1]

2.5.3 Slitiny hliníku s hořčíkem

Pro liti pod tlakem je velmi nevýhodný velký interval tuhnutí slitin s obsahem asi 9 - 12 % Mg, který se požívá pro jejich výbornou odolnost proti korozi. Aby se snížily nepříznivé účinky železa, legují se manganem v rozmezí 0,3 – 0,8 %, který současně zvyšuje pevnostní vlastnosti a odolnost proti korozi.

Křemíkem se legují kvůli zlepšení slévarenských vlastností. Svými mechanickými vlastnostmi patří mezi nejkvalitnější slévarenské slitiny hliníku. Mají sklon k tvorbě staženin, vysokou smrštivost a malou zabíhavost. Sklony k oxidaci se potlačují přísadou 0,02 % Be. Technologické vlastnosti však nejsou dobré (lepení), a proto je třeba při liti pod tlakem velkých zkušeností a úpravy forem.

2.5.4 Slitiny hliníku s mědí

Slévárenské slitiny na bázi Al – Cu se v porovnání se slitinami na bázi Al – Si vyznačují vyššími pevnostními vlastnostmi při zvýšených teplotách, ale mají zhoršenou odolnost proti korozi, také jsou náchylné na vznik trhlin a hůře se odlévají. Jsou tepelně zpracovatelné. Používají se na výrobu hlav válců spalovacích motorů, případně na výrobu odlitků dalších zařízení, pracujících při zvýšených teplotách. Slitiny obsahující 4 % Cu, 0,5 – 1,5 % Mg a 0,5 – 1 % Mn jsou známe pod názvem duraly.

2.5.5 Slitiny hliníku se zinkem

Binární slitiny Al – Zn mají špatné slévárenské vlastnosti (zejména vysokou smrštitivost). Pro jejich zlepšení se jako dalších legur používá Si, Cu a Mg. V současné době se vyrábějí slitiny Al – Zn – Mg nebo Al – Zn – Si – Mg. Je-li celkový obsah legur vyšší než 8 %, dochází u slitin k značnému zhoršení odolnosti proti interkrystalické korozi.

2.5.6 Ložiskové slitiny hliníku

Na výrobu ložisek se používají slitiny Al – Sn. Cín s hliníkem netvoří tuhý roztok. Při 0,5 % Sn krystalizuje eutektikum uložené ve struktuře mezi dendrity primárního hliníku. Vzhledem k tomu, že se používá nadeutektických slitin, jsou ve struktuře uložena zrna primárního Sn. Polyedrický, kompaktní tvar těchto zrn cínu se dosahuje zvýšením jejich povrchového napětí při krystalizaci malými přísadami mědi a niklu. Významné ložiskové slitiny jsou AlSn6Cu, AlSn20Cu, AlSn6SiCu [1].

2.6 Technologické vlastnosti

Odlévání hliníku a jeho slitin je důležitým technologickým pochodem pro výrobu tvarových odlitků.

Vhodnost slitin pro výrobu složitých tvarových odlitků je závislá na jejich technologických a slévárenských vlastnostech. Technologické vlastnosti slitin jsou odlišné pro jednotlivé technologie odlévání.

2.6.1 Teplota tuhnutí

Teplota tuhnutí, na které především závisí teplota lití, má při lití pod tlakem mnohem větší význam než při lití do písku. Teplotními rázy je ocelová forma tím více namáhána, čím větší je teplotní rozdíl mezi litým kovem a teplotou formy. Proto s vyšší teplotou tuhnutí klesá trvanlivost formy.

Na teplotu tuhnutí slitin mají vliv přísady. Vliv dalších složek je důležitý jen tehdy, jsou-li přítomny ve větším množství. Teploty počátku a konce jsou uvedeny v přehledné tabulce č.2-1 [4].

Tabulka č.4. Slévárenské vlastnosti slitin hliníku

ČSN	Druh slitiny	Interval teplot tuhnutí (°C)	Měrná hmotnost (kg/dm ³)	Zabíhavost (mm)	Objem stažení (%)	Délkové smrštění (%)	Odolnost proti vzniku trhlin
42 4330	AlSi 13	580 - 577	2,65	510	3,0	0,80	velmi dobrá
42 4336	AlSi 12 CuNiMg	591 - 538	2,66	500	4,3	0,80	velmi dobrá
42 4331	AlSi 10 Mg	601 - 569	2,67	500	3,3	0,84	velmi dobrá
42 4332	AlSi 7	620 - 577	2,66	470	3,8	1,00	velmi dobrá
42 4338	AlSi 8 Cu 4	590 - 530	2,74	355	4,1	1,10	dobrá
42 4381	AlSi 5 Cu 2	578 - 540	2,74	405	4,9	1,08	dobrá
42 4315	AlCu 4 Ni 2Mg	630 - 538	2,81	235	5,3	1,40	malá
42 4515	AlMg 5	641 - 579	2,65	270	4,1	0,97	dobrá
42 4518	AlMg 11	621 - 499	2,58	260	4,9	1,30	malá

2.6.2 Tepelná vodivost

Na rychlost odvodu tepla z vnitřních stěn odlitku má teoreticky také vliv tepelná vodivost slitiny. Uplatňuje se především, až když je slitina tak ztuhlá, že z ní teplo není odváděno jejím prouděním uvnitř odlitku.

Tepelná vodivost je největší u čistých kovů, nejmenší je u slitin, které tvoří roztoky. Protože při tuhnutí dochází mnohdy k zmenšení rozpustnosti, může dojít v takovém případě k zvýšení tepelné vodivosti. Je však třeba dbát na to, že poměrně největší vliv mají nejmenší přísady. Při chladnutí tenkých průřezů je vliv tepelné vodivosti vždy menší než u tlustých. Za podmínek tlakového lití o odvodu tepla ze slitiny rozhodují v mnohem větší míře vlastnosti formy.

2.6.3 Obsah plynů v roztavené slitině

U všech tavenin, které obsahují plyny, dochází ke značnému zmenšení jejich rozpustnosti ve slitině při vlastním tuhnutí. Tuhnou-li však slitiny rychle, zůstává ve slitině rozpuštěno i v tuhém stavu více plynů než při pomalém tuhnutí. Proto při malém naplynění slitiny při tavení a tenkých stěnách odlitků je nebezpečí pórovitosti způsobené obsahem plynů v tavenině menší než u tlustších stěn a pomalého tuhnutí. Z toho však nevyplývá, že by se naplynění taveniny nemuselo kontrolovat.

Jakmile jsou totiž podmínky pro vyloučení plynu příznivé, tj. jestliže tavenina obsahuje větší množství plynu, stěna odlitku je širší, nebo špatným odvodem určitého místa formy tuhne pomaleji, má plyn uvnitř stěny dosti času, aby se vyloučil. Tím se zvětší pórovitost i napětí vnějších již ztuhlých vrstev a zmenší se i smrštění. Zvýší se tak nebezpečí netěsnosti i praskavosti. Všeobecně proto platí, že u slitin pro lití pod tlakem je třeba pečlivě kontrolovat naplynění. Zvlášť důležité je to u slitin hliníku.

2.6.4 Zabíhavost

Při odlévání musí tekutý kov dobře vyplnit formu, musí dobře zabíhat. Zabíhavost není závislá jen na vlastnostech použité slitiny, ale i na licích

podmínkách, vlastnostech formy, vlastní konstrukci odlitku apod. Proto při porovnávání zabíhavosti jednotlivých slitin je nutno zachovat ostatní podmínky neměnné.

Z hliníkových slitin mají nejlepší zabíhavost slitiny se složením přibližně eutektickým, tj. AlSi 12, AlSi 10 Mg a pístová slitina AlSi 12 CuNiMg. Slitiny s nižším obsahem křemíku a slitiny s hořčíkem mají zabíhavost menší [4].

Zabíhavost lze ve značné míře ovlivnit změnou lící teploty. Proto pro odlitky s menší tloušťkou stěny volíme teplotu lití vyšší než pro odlitky tlustostěnné. Lící teplotu však nelze zvyšovat neúměrně vysoko, protože odlitky lité při vysokých teplotách jsou pórovité, nekvalitní. Na zabíhavost také příznivě působí při lití do kovových forem vhodné předeřtání formy.

2.6.5 *Stahování*

U tvarových odlitků jsou nejnepříznivější staženiny rozptýlené po celém průřezu odlitku, zatímco soustředěné staženiny o malém objemu většinou odlitek neznehodnocují. Stahování je převážně způsobeno objemovou kontrakcí v kapalném stavu a při tuhnutí a roste proto při konstantní střední teplotě formy s lící teplotou slitiny.

Nejmenší staženiny jsou u slitin hliníku s přibližně eutektickým plněním. Větší objem staženin je u slitin s menším obsahem křemíku, jako je AlSi 7, AlSi 8 Cu 4, nebo AlSi 5 Cu 2 [4].

Staženinám je možno čelit nálitkováním. Tento způsob není při lití pod tlakem možný a proto je nutné se smířit s tím, že u odlitků litých pod tlakem vnitřek stěn odlitku nebude bez pórů, dutinek a ředin, k jejichž vzniku může přispívat nedokonalé odvětrání a naplynění. Proto mají tak velký význam povrchové vrstvy stěny jež rozhodují o těsnosti a nejvíce přispívají k dobrým hodnotám mechanických vlastností. Nejúčinnějším prostředkem proti stahování je co nejnižší lící teplota, které lze právě při lití pod tlakem nejsnáze dosáhnout.

2.6.6 Smršťování

Vlastní smrštění závisí z fyzikálních vlastností v převážné míře přímo na tepelné roztažnosti slitiny v tuhém stavu. Čím menší je koeficient tepelné roztažnosti v intervalu teplot solidu, tím výhodnější je slitina z hlediska všech nepříznivých vlivů smrštění. Nepřímo může být ovšem smrštění ovlivněno vysokou lící teplotou, zvýší-li se teplota kovové formy. Zpomalí se jí vytvoření těsné povrchové vrstvy a zmenší se tím smrštění. Zmenší se také míra smrštění ve srovnání se studenou formou, neboť vlivem vyšší provozní teploty se forma roztáhne více, než se předpokládalo.

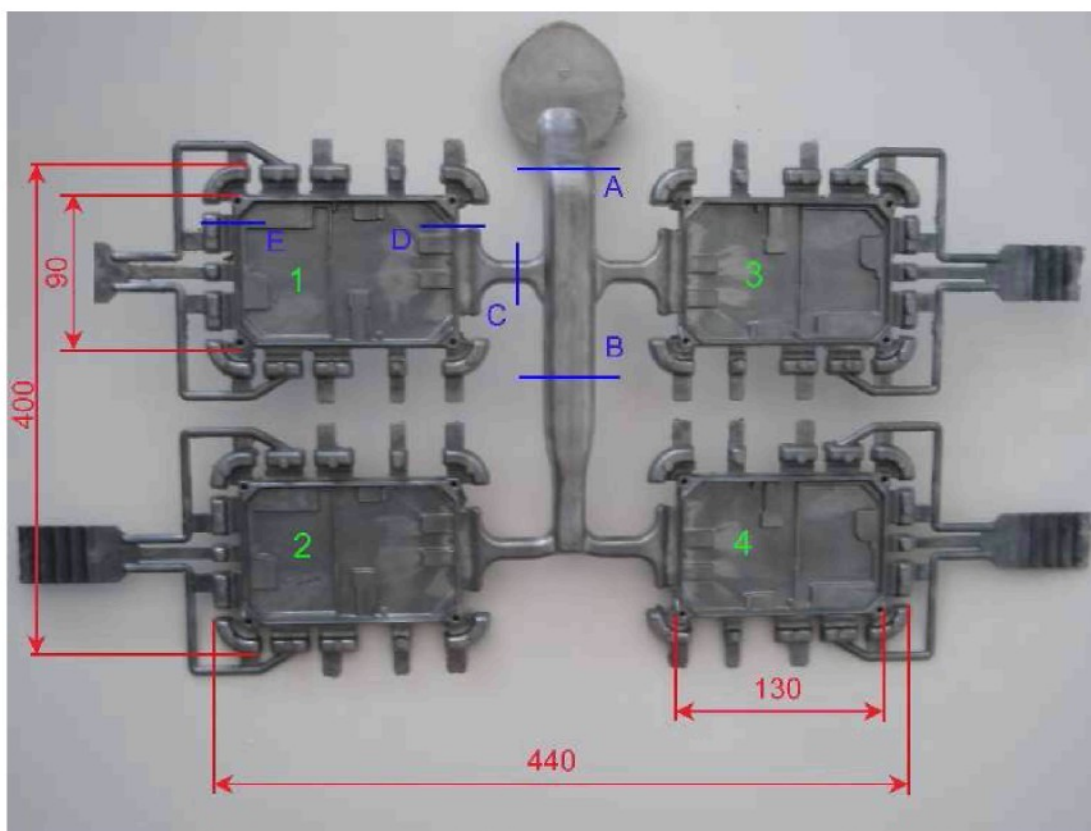
Velký význam má také tuhost kovových forem a jader, která zabraňuje smršťování.

2.6.7 Sklon k trhlinám a prasklinám

Trhliny se tvoří jen v údobí intervalu tuhnutí, pokud existují současně dvě fáze, tekutá a tuhá. Praskliny vznikají za teplot podstatně nižších v důsledku pnutí v odlitcích během chladnutí. Sklon k vzniku trhlin je tím menší, čím menší je interval tuhnutí slitiny (proto čistý hliník a eutektické slitiny mají malý sklon k trhlinám), a čím je jemnější zrn. Proti vzniku prasklin působí zpomalení chladnutí, souměrná konstrukce odlitků a usnadnění deformace odlitků.

3. EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je výzkum struktury odlitků ze slitiny hliníku (AlSiCu12), vyrobené tlakovým litím s různou hodnotou dotlaku. K tomuto účelu byl vybrán vhodný odlitek deskovitého tvaru, ze kterého lze získat i zkušební tělíska pro zkoušku pevnosti v tahu a lze dobře provést měření tvrdosti. Tento odlitek je vyráběn ve čtyřnásobné dutině formy, ze které se získává výpad (tlakový stromeček) jehož součástí je vtokový kůl, na kterém jsou na jednotlivých zářezích připojeny čtyři deskovité odlitky pravidelných tvarů viz obr.3.1



Obr.3.1 Výpad (tlakový stromeček). Označení míst odebraných vzorků A, B, C, D, jednotlivé odlitky jsou označeny čísly 1,2,3,4

Tlakový stromeček byl odlit ze slitiny AlSi12Cu, jehož celkové rozměry jsou 400 x 440 mm. Jednotlivé deskové odlitky mají rozměry 90x130 mm a jejich tloušťka stěny na dně odlitku je 1,6 mm.

Na obrázku jsou pro lepší orientaci označeny místa odběru jednotlivých metalografických vzorků, které jsou rozlišeny písmeny A,B,C,D,E,L.

3.1. Popis výroby tlakově litých odlitků

Vsázka byla připravena v poměru 60/40 (nový materiál/vratný materiál). Nový materiál je ve formě housek (cca. 3 kg) a spolu s vratným materiálem byl taven v plynové kelímkové peci MORGAN osazené grafitovým kelímkem o obsahu 800 kg. Během tavení byla tavenina upravena pomocí rafinační soli COVERAL GR 2410. Po roztavení slitiny a ohřátí na teplotu 780°C byla slitina odplyněna na zařízení FDU – FOSECO směsí plynu N₂/H₂ – 80/20. Odplynění probíhalo po dobu 3 min rychlostí proudění plynu 20 l.min⁻¹. Slitina se během odplynění neočkovala ani nemodifikovala. Po desetiminutovém odstání byla slitina připravena k odlévání. Hmotnost slitiny při nalití byla 1,532 kg. Slitina byla nalita do udržovací pece STRIKO WESTOFEN W 650 SL ProDos o obsahu 650 kg, ze které automatický dávkovač zásobuje stroj stanoveným množstvím taveniny do dutiny lící komory. Udržovací pec stroje udržuje lici teplotu na 680°C ± 5°C. Chemické složení slitiny AlSi12Cu bylo zjištěno pomocí zařízení ARL 3460 Metals analyzátor. Chemické složení této slitiny ukazuje tab.3-1

Tab.3-1 Chemické složení slitiny AlSi12Cu

Chemické složení slitiny AlSi12Cu [%]										
Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Zn	Ni	Cr	Pb	Al
1,12	0,23	11,3	0,73	0,23	0,13	0,47	0,05	0,02	0,04	85,7

Odlitek byl vyhotoven na horizontálním tlakovém stroji se studenou lící komorou TOS TL5 – 630/750, který je uveden na obr.3.2



Obr.3.2 Horizontální tlakový stroj TOS TL5

U tohoto stroje působí akumulátorový tlak přímo na plochu hydraulického lisovacího pístu a tím je dosaženo plnicí síly. Pístový akumulátor umožňuje dosažení strmého náběhu lisovací rychlosti. Řízení pohybu lisovacího pístu všech strojů zajišťuje regulátor průtoku.

Uzavírací část je tvořena kloubovým mechanismem se čtveřicí vodících sloupů. Kloubový mechanismus je ovládán hydraulickým válcem. Uzavírací síla je snímána na jednotlivých sloupech nebo centrálně. Uzavírací mechanismus je vybaven přestavovacím zařízením, které umožňuje automatické přestavení na zvolenou výšku formy a automatickou regulaci síly.

Stroj obsahuje řídicí systém, který zajišťuje dávkování kovu, ošetření formy, mazání lící komory.

Průběh tlaku a dotlaku se zadává bodovým způsobem – tlak v komoře (vypočtená hodnota) a čas. Stabilita tlaku je zajištěná regulací v reálném čase na základě vyhodnocování skutečných hydraulických tlaků. Průměr pístu a průměr tablety byl 75 mm a další parametry tohoto stroje jsou uvedeny v tabulkách 3-2, 3-3, 3-4.

Tab.3-2 Parametry tlakového stroje TOS TL5

Uzavírací část	parametry	jednotky
jmenovitá uzavírací síla	6300	kN
maximální uzavírací síla	7500	kN
max.zdvih nosiče forem	700	mm
rozměry upínacích desek	1200x1200	mm
světlost mezi sloupy	755x755	mm
max / min výška formy	900 / 350	mm
síla hydraul. vyrážače	50 - 330	kN
zdvih vyrážače	160	mm
osová výška stroje	1430	mm
rychlost uzav./otevírání stroje	480 / 390	mm/s

Tab.3-3 Parametry tlakového stroje TOS TL5

Lisovací část	parametry	jednotky
plnicí síla (počáteční)	280 - 607	kN
zdvih lisovacího pístu	560	mm
průměry plnicích soustav	60 - 120	mm
max.hmotnost nalité slitiny při ø plnicí soupravy 120mm / 50mm	10,6 / 2,6	kg
maximální lisovací rychlost	6	m/s

Tab.3-4 Parametry tlakového stroje TOS TL5

Provozní údaje	parametry	jednotky
celkový příkon stroje	57,1	kW
výkon elektromotoru čerpadel	45	kW
napájení řídicích obvodů	2	kW
max.provoz. tlak hydr. systému	16	MPa
provozní tlak akumulátoru	16	MPa
hmotnost stroje	26500	kg
rozměry délka / šířka / výška	7950 / 2800 / 2750	mm

V tlakovém stroji byla čtyřnásobná forma, jejíž tvarové vložky byly vyrobeny z nástrojové legované oceli Dievar X35CrMoV5-2 od firmy Uddeholm. Rám byl vyroben z mat. DIN 1.2311. Forma byla přehřátá na pracovní teplotu, která na lici činila 230 °C. Technologické a lici parametry jsou zaznamenány zařízením Electronics a jsou zobrazeny pomocí záznamů, viz příloha č.1.

Pro odlévání byla použita slitina z jedné tavby a odlitky byly připraveny v jeden den. Pro pozorování a porovnávání struktury slitiny hliníku byly odlity ekvivalentní odlitky při třech různých dotlacích v lici komoře, které jsou zaznamenány v tab.3-5.

Tab.3-5 Podmínky experimentu

Použitá slitina	Velikost dotlaku v lici komoře [MPa]			Teplota lití	Podmínky odplynění
AlSi12Cu ČSN 424330 (EN 1706 ENAC 47100)	10	35	120	680°C ± 5°C	FDU 3 min H ₂ /N ₂ 80/20

3.2 Metalografie a hodnocení struktury

Podrobnosti o stavbě a jiných vlastnostech struktury zjistíme vyvoláním tzv. mikrostruktury prostřednictvím vyhotovených metalografických vzorků.

Prvním předpokladem je správné připravení vzorků. Nejprve byly vybrány vhodné části odlitku ze slitiny Al, na kterých byla připravena vhodná plocha pro pozorování struktury. Vzorky byly připraveny běžným metalografickým způsobem zality, broušeny a leštěny na brusných papírech o zrnitosti 240, 320, 400 a 600 a byly leštěny na kotouči potaženém plstí pomocí leštící diamantové pasty DINAS a 100% lihu nebo glycerínu s lihem.

Přehled metalografických vzorků, které byly podrobeny této analýze je uveden v příloze č.2. Přípravě metalografických vzorků byla věnována značná pozornost. Pro zvýraznění struktury byl povrch vzorků naleptán speciálním leptadlem 0,5 % roztokem kyseliny fluorovodíkové - HF v destilované vodě.

Po naleptání byla struktura sledována na světelném mikroskopu NEOPHOT 21 výrobce: Carl Caiss Jena. Z jednotlivých vzorků byly vybrány nejlépe povedené metalografické výbrusy z různých míst odlitku. Struktura těchto odlitků byla

sledována v laboratoři na Katedře materiálů pomocí mikroskopu NIKON EPIPHON 200 a hodnocena pomocí softwaru LUCIA.5 (od firmy Laboratory Imaging, viz obr.3.3) při 100 násobném zvětšení. Jak již bylo uvedeno v úvodu experimentální části vzorky byly vybrány z různých míst jednotlivých odlitků při různých dotlacích, přehled jednotlivých pozorovaných vzorků je uveden v tab.3-6. Hodnocené struktury jsou uvedeny v příloze č.3.

Tab.3-6 Označení vzorků pro pozorování

DOTLAK	VZORKY						
				koleno	stěna	koleno	stěna
10 MPa	4A	4B	4C	4D1	4D2	4E1	4E2
35 MPa	5A	5B	5C	5D1	5D2	5E1	5E2
120 MPa	6A	6B	6C	6D1	6D2	6E1	6E2

Vysvětlivky: čísla 4,5,6 značí vzorky při dotlacích 10, 35, 120 MPa, jednotlivá písmena značí místa odběru vzorku, 1,2 za písmeny - struktury byly vyhodnocovány ve dvou místech jednoho vzorku 1- koleno, 2- stěna



Obr.3.3 Světelný mikroskop NIKON EPIPHON 200
se softwarem LUCIA.5

3.2.1 Měření a zpracování výsledků

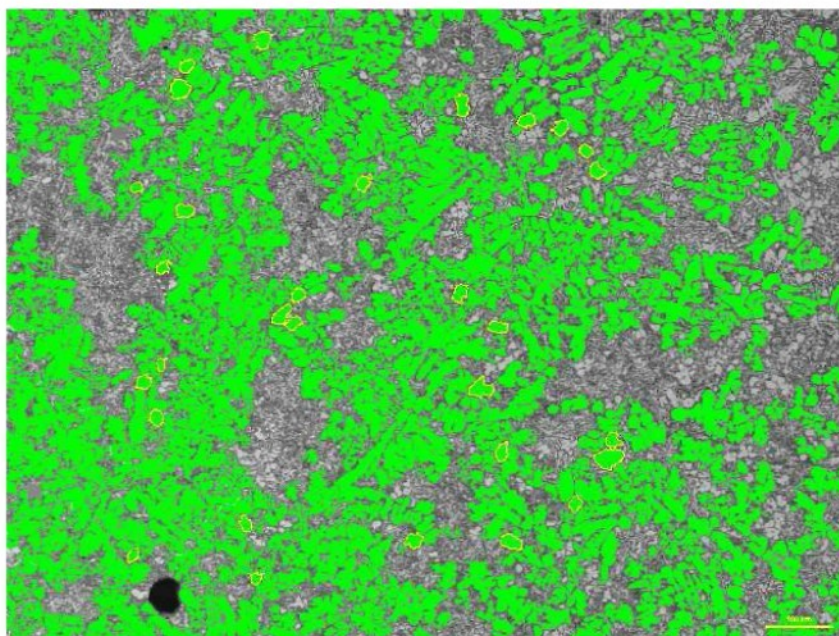
Na softwaru LUCIA.5 byla hodnocena struktura vzorků:

- Podíl tuhého roztoku alfa
- Ekvivalentní průměr plochy primární fáze alfa
- Hodnoty ploch částic primárního tuhého roztoku alfa zastoupené ve zkoumané části vzorku

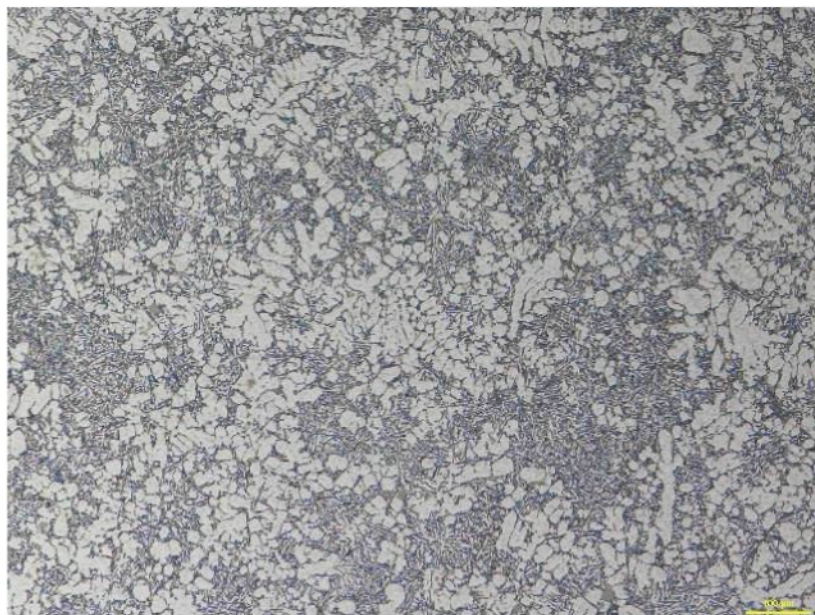
Pomocí softwaru, byl nejprve nasnímaný dokument překalibrován a převeden do šedého obrazu. Další zvolenou funkcí, transformace prahování, byly zvýrazněny jednotlivé fáze ve struktuře určitým stupněm šedi. Prostřednictvím funkce „AREA FRACTION“, byl odečten procentuální podíl primárního tuhého roztoku alfa včetně eutektika.

Prahováním a následnými korekcemi (morfologickou separací, vyčištěním objektu) byla zmapována měřená fáze a připravená na vyhodnocování jednotlivých útvarů. Prahování a korekce jsou vyznačeny na obr.3.4. Podíly tuhého roztoku alfa byly zvýrazněny barvou zelenou nebo modrou. Změnu barev struktury je možné nastavit v softwaru.

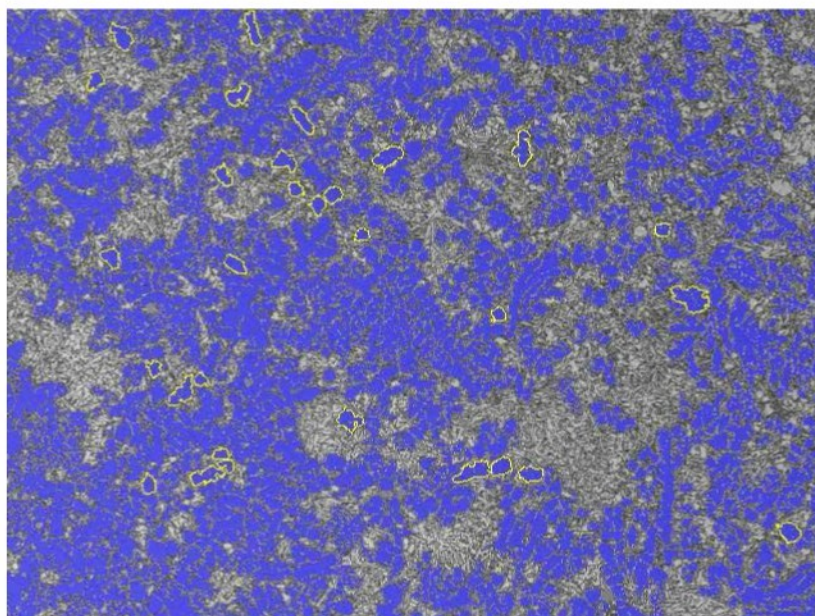
Označením jednotlivých částic jsou jejich tvary prostřednictvím softwaru LUCIE.5 přepočítány a nahrazeny plochou kružnice, ze které je určen průměr kružnice tzv.ekvivalentní průměr plochy. Celkem bylo vybráno 30 měřených útvarů různých velikostí a tvarů viz obr.3.5. podobajících se kruhovým plochám, aby rozdíl v přepočtu při náhradě asymetrické plochy kružnicí byl minimální. Ekvivalentní průměr plochy primární alfa fáze byl vyhodnocen po změření 30 vybraných zástupců ve sledované ploše.



Obr.3.4 Prahování a korekce struktury (100 x zvětšení, leptáno 0,5% HF)



Obr.3.5 a)



Obr.3.5 b) Naprahování a výběr jednotlivých útvarů primárního tuhého roztoku alfa (100x zvětšení, leptáno 0,5% HF)

Pro ilustraci, je na obr.3.5 a) uvedena struktura převedena do obrazu šedi, na obr.3.5 b) je uvedena struktura po naprahování a po korekcích (morfologické separaci, vyčištění) a po vybrání 30 jednotlivých částic primárního tuhého roztoku alfa.

Po naprahování bylo na každém vzorku vybráno 30 různých objektů krystalů (částic). Na těchto krystalech byly zjištěny tyto parametry: plocha objektu, ekvivalentní průměr, maximální rozměr, minimální rozměr, obvod. Získané hodnoty vybraných struktur pro různé dotlaky jsou uvedeny v příloze č.4. Ostatní hodnoty všech měřených struktur jsou uvedeny na vloženém kompaktním disku (CD).

Výsledky měření pro jednotlivé vzorky byly zobrazeny prostřednictvím programu MOZZILA, přepočítány softwarem na střední hodnoty a jsou uvedeny v tabulkách 3-7, 3-8, 3-9, závislosti ekvivalentního průměru plochy primární alfa fáze a podílu fáze alfa na dotlaku je znázorněna na obr.3.6, obr. 3.7.

Tab.3-7 Výsledky měření struktury AlSi12Cu při dotlaku 10 MPa

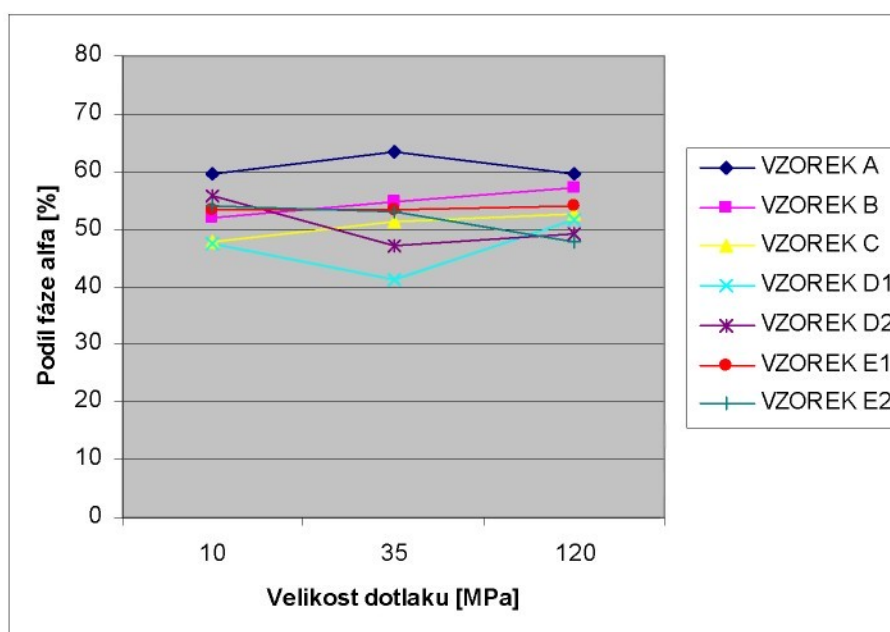
ODLITEK č.1 dotlak 10 MPa						
vzorek	celkový podíl fáze α [%]	plocha primární fáze α [μm^2]	obvod [μm]	max. rozměr plochy [μm]	min. rozměr plochy [μm]	ekvivalentní průměr plochy primární fáze α [μm]
4A	59,529	1283,05	198,93	54,82	36,01	38,28
4B	51,953	766,13	126,74	42,28	26,82	30,66
4C	47,668	725,82	120,84	40,44	27,2	29,1
4D1	57,401	713,2	117,92	39,92	26,73	29,6
4D2	55,806	696,72	118,23	38,35	24,04	26,64
4E1	53,334	786,6	126,44	42,61	25,61	27,8
4E2	54,181	761,81	121,67	40,4	21,73	25,34

Tab.3-8 Výsledky měření struktury AlSi12Cu při dotlaku 35 MPa

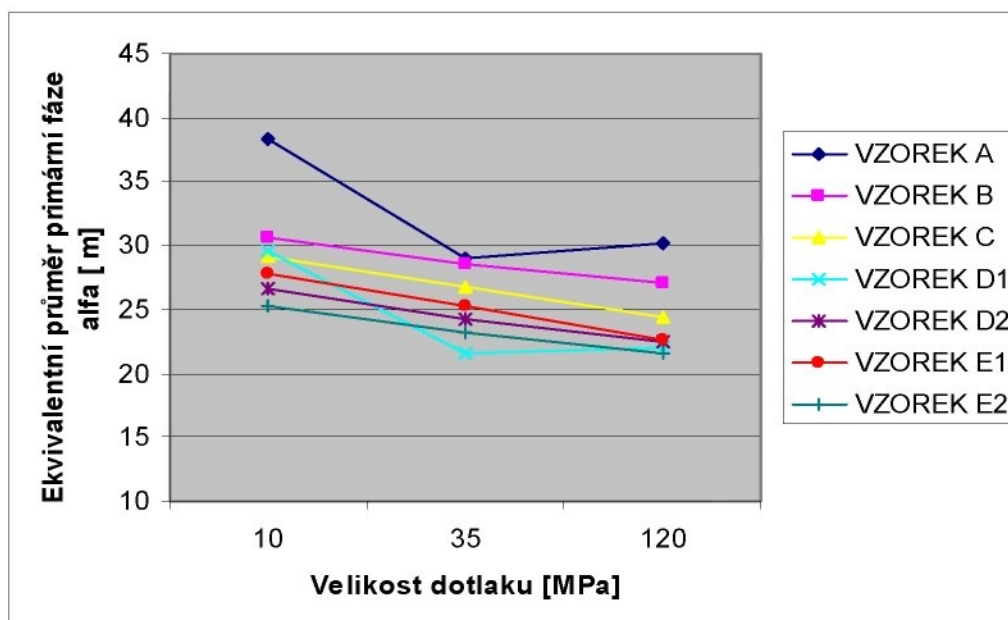
ODLITEK č.2 dotlak 35 MPa						
vzorek	celkový podíl fáze α [%]	plocha primární fáze α [μm^2]	obvod [μm]	max. rozměr plochy [μm]	min. rozměr plochy [μm]	ekvivalentní průměr plochy primární fáze α [μm]
5A	63,344	630,9	110,31	36,77	25,76	28,91
5B	54,669	670,81	119,7	38,58	26,77	28,51
5C	51,378	597,07	105,71	35,13	24,71	26,69
5D1	41,304	375,99	77,54	28,08	19,4	21,59
5D2	47,112	490,73	94,65	31,45	22,52	24,21
5E1	53,428	499,05	109	37,18	21,07	25,33
5E2	52,987	424,71	89,93	31,95	20,29	23,22

Tab.3-9 Výsledky měření struktury AlSi12Cu při dotlaku 120 MPa

ODLITEK č.3 dotlak 120 MPa						
vzorek	celkový podíl fáze α [%]	plocha primární fáze α [μm^2]	obvod [μm]	max. rozměr plochy [μm]	min. rozměr plochy [μm]	ekvivalentní průměr plochy primární fáze α [μm]
6A	59,615	744,22	122,5	39,62	27,95	30,16
6B	57,152	615,46	113,96	35,14	25,23	27,06
6C	52,735	478,55	89,89	31,35	22,2	24,38
6D1	51,437	470,13	88,48	31,03	19,78	21,99
6D2	49,231	448,78	89,46	30,43	21,64	22,46
6E1	53,917	458,27	88,88	31,2	20,49	22,68
6E2	47,526	491,81	90,97	32,26	19,57	21,52



Obr. 3.6 Grafická závislost primárního tuhého roztoku alfa na velikosti dotlaku



Obr. 3.7 Grafická závislost ekvivalentního průměru plochy částice primárního tuhého roztoku alfa na velikosti dotlaku

Z výsledných hodnot a grafické závislosti obr.3.6 vyplývá, že čím větší dotlak působí na taveninu, tím se podíl fáze alfa zvyšuje, což se nejvíce projevuje zejména ve vtokové soustavě v místech A,B,C.

Z obrázku 3.7 vyplývá, že s rostoucím dotlakem se zmenšuje průměr plochy primární alfa fáze a výsledkem je jemnější struktura. Nejvíce se vliv dotlaku na velikost ploch primárního tuhého roztoku projevuje ve vtokové soustavě.

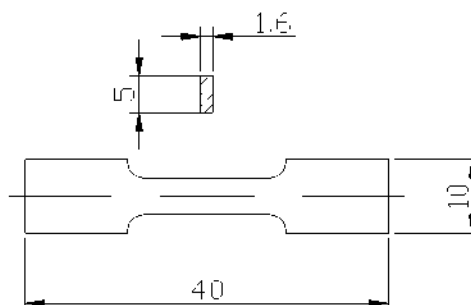
V místech D,E je nutné počítat s tepelnou akumulací formy a s tím související rychlostí tuhnutí odlitku. Nejvíce působí dotlak na taveninu ve vtokové soustavě, zde je velké průtočné množství kovů a tím menší ztráta tepla taveniny způsobená odvodem tepla do formy. V této souvislosti je nutné také uvažovat, že při proudění taveniny do dutiny formy dochází k turbulencím, které také ovlivňují strukturu odlitku. Vlivem turbulentního proudu taveniny vzniká také ve struktuře pórovitost.

3.3 Stanovení mechanických vlastností

3.3.1 Zkouška tahem

Zkouška byla provedena na zkušebních tyčkách obdélníkového průřezu, viz obr.3.8. Pro stanovení pevnosti v tahu byly z jednotlivých odlitků tlakového stromečku odebrány dvě zkušební tyčky, které byly označeny podle místa odběru A, B a podle odběru z odlitků označených (1,2,3,4) vyrobených odlišnými dotlaky, které spolu s naměřenými hodnotami znázorňuje tabulka 3-10.

Zkouška tahem a stanovení meze pevnosti byla provedena na trhacím stroji HOUNSFIELD – H10KT. Rychlost tažníku byla 10mm/min.



Obr.3.8 Rozměry zkušební tyčky

Podstata zkoušky spočívá v zatěžování zkušební tyčky předepsanou rychlostí, až do rozrušení, aby se stanovila mez pevnosti v tahu zkoušeného materiálu odlitku. Mez pevnosti v tahu R_m je napětí, odpovídající podílu největšího zatížení a počátečního průřezu zkušební tyčky.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (16)$$

kde značí: R_m – mez pevnosti v tahu [MPa];

F_m – maximální síla [N];

S_0 – počáteční průřez [mm];

Tab. 3-10 Výsledky měření meze pevnosti

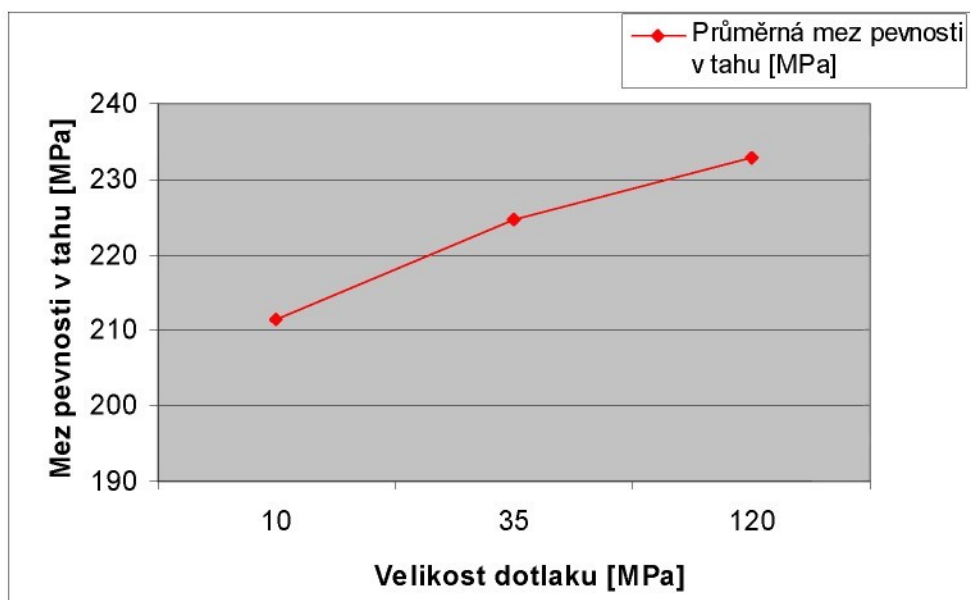
Velikost dotlaku [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]							
	ODLITEK 1		ODLITEK 2		ODLITEK 3		ODLITEK 4	
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
10	202,34	259,36	162,12	252,14	178,62	264,86	150,48	221,26
35	274,81	253,97	262,36	158,69	248,03	157,41	227,63	215,08
120	149,09	285,01	257,24	265,02	245,63	219,77	198,16	243,28

Důsledkem turbulentního proudění se vytváří v jednotlivých odlitcích porezita, která ovlivňuje mechanické vlastnosti odlitků, proto některé naměřené hodnoty jsou výrazně odlišné.

Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty uvedeny v tabulce 3-11 a následně byla provedena grafická závislost meze pevnosti v tahu na dotlaku viz obrázek 3.9

Tab.3-11 Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu

velikost dotlaku [MPa]		
10	35	120
Průměrná hodnota meze pevnosti [MPa]		
211,39	224,75	232,9



Obr.3.9 Grafická závislost meze pevnosti v tahu

Z výsledků měření a grafické analýzy vyplývá, že s rostoucí hodnotou dotlaku roste i mez pevnosti v tahu.

3.3.2 Zkouška tvrdosti

Pro posuzování tvrdosti struktury odlitku byla provedena statická vnikací zkouška tvrdosti dle Brinella (ČSN 42 0371). Při zkoušce dle Brinella byla do zkoušeného materiálu zatlačována kalená ocelová kulička určitou silou F po dobu t . Podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce 3-12.

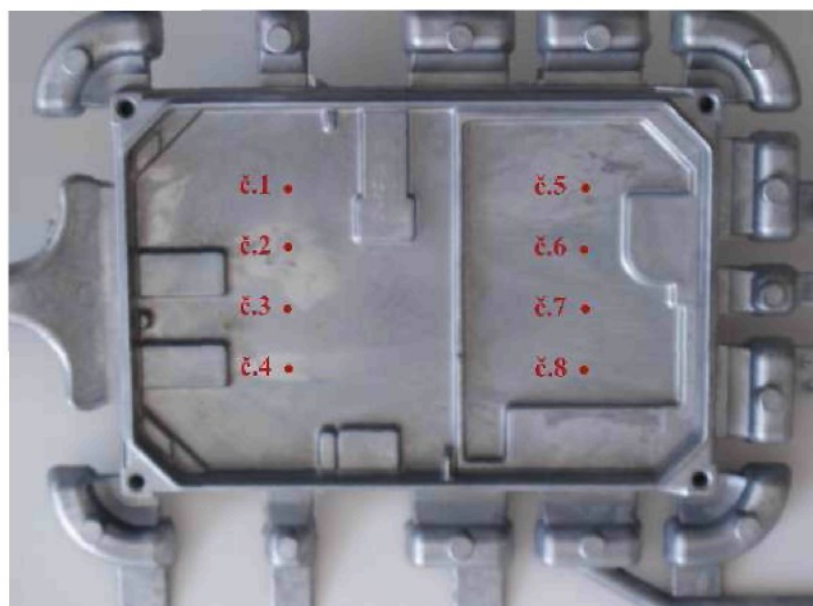
Tab.3-12 Podmínky experimentu

Zkouška tvrdosti dle Brinella		
Průměr kuličky [mm]	Zatěžující síla F [N]	Doba působení t [s]
2,5	612,92	45

Tvrdost podle Brinella závisí do značné míry na podmínkách zkoušky. Aby výsledky byly srovnatelné, je nutno dodržovat podmínky, které jsou uvedeny v normě.

Na výsledek má vliv zejména velikost zatížení pro daný průměr kuličky, doba zatěžování a velikost vtisku se zřetelem na rozměry zkoušeného předmětu.

Tvrdost byla sledována na odlitcích jednotlivých výpadů. Na každém odlitku bylo provedeno osm měření. Čtyři měření byla provedena na straně vtoku odlitku a čtyři měření byla provedena na odlehle straně vtoku (proti vtoku), viz obr.3.10. Měření bylo provedeno v jeden den, aby byla vyloučena vytvrzovací schopnost slitiny. Zkouška tvrdosti byla provedena na tvrdoměru WPM – 308. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 3-13, 3-14, 3-15



Obr. 3.10 označení míst pro měření zkoušky tvrdosti

Tab. 3-13 Výsledky měření tvrdosti pro výpad č.1 při dotlaku 10 MPa

Místo měření	Pozice měření	Výpad (10 MPa)			
		ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Oblast vtoku	č.1.1	112	116	115	118
	č.2.1	115	115	113	118
	č.3.1	112	115	115	115
	č.4.1	112	115	115	115
Oblast proti vtoku	č.1.2	112	115	115	116
	č.2.2	115	117	118	115
	č.3.2	118	118	120	115
	č.4.2	112	115	115	115

Tab. 3-14 Výsledky měření tvrdosti pro výpad č.2 při dotlaku 35 MPa

Místo měření	Pozice měření	Výpad (35 MPa)			
		ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Oblast vtoku	č.1.1	112	118	118	118
	č.2.1	112	115	118	118
	č.3.1	112	120	120	120
	č.4.1	115	115	118	118
Oblast proti vtoku	č.1.2	114	121	118	120
	č.2.2	118	120	120	116
	č.3.2	118	118	118	115
	č.4.2	120	115	118	115

Tab. 3-15 Výsledky měření tvrdosti pro výpad č.3 při dotlaku 120 MPa

Místo měření	Pozice měření	Výpad (120 MPa)			
		ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Oblast vtoku	č.1.1	118	115	118	115
	č.2.1	121	115	116	118
	č.3.1	121	115	118	118
	č.4.1	121	116	118	120
Oblast proti vtoku	č.1.2	118	118	118	115
	č.2.2	118	118	120	116
	č.3.2	120	116	115	120
	č.4.2	121	118	121	120

Shrnutí výsledků měření

Hodnoty tvrdosti v jednotlivých oblastech byly statistickými výpočty přepočteny na střední hodnoty, které jsou uvedeny v tabulkách 3-16, 3-17, 3-18

Tab.3-16 Průměrné hodnoty tvrdosti při dotlaku 10 MPa

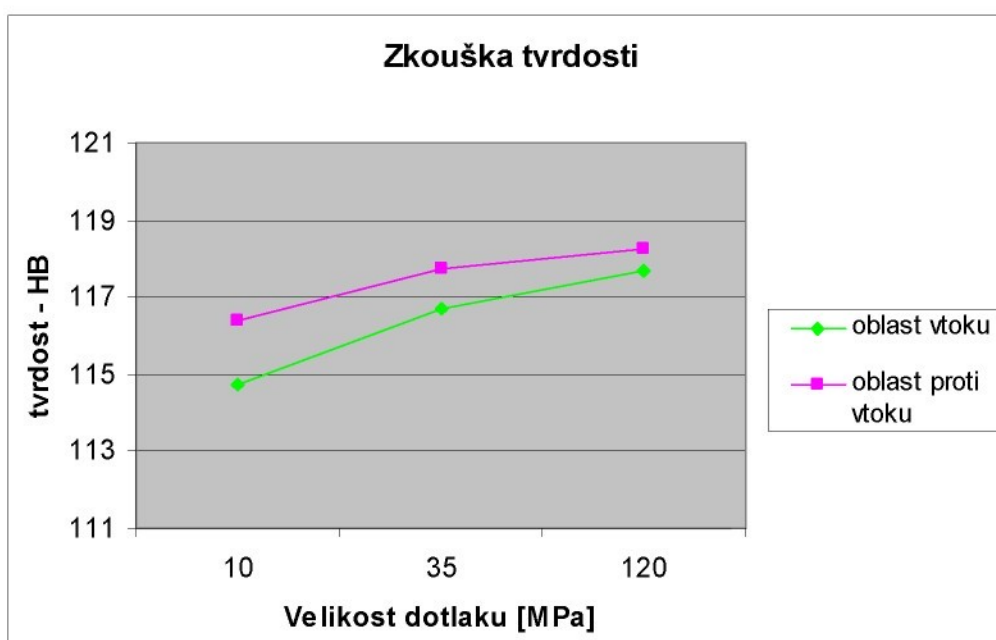
Výpad (10 MPa)			
ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Průměrná hodnota tvrdosti v oblasti vtoku			
112,75	115,25	114,5	116,5
Průměrná hodnota tvrdosti proti oblasti vtoku			
115,75	116,25	118,25	115,25
Celková průměrná hodnota v oblasti vtoku			
114,75			
Celková průměrná hodnota proti oblasti vtoku			
116,375			

Tab.3-17 Průměrné hodnoty tvrdosti při dotlaku 35 MPa

Výpad (35 MPa)			
ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Průměrná hodnota tvrdosti v oblasti vtoku			
112,75	117	118,5	118,5
Průměrná hodnota tvrdosti proti oblasti vtoku			
117,5	118,5	118,5	116,5
Celková průměrná hodnota v oblasti vtoku			
116,687			
Celková průměrná hodnota proti oblasti vtoku			
117,75			

Tab.3-18 Průměrné hodnoty tvrdosti při dotlaku 120 MPa

Výpad (120 MPa)			
ODLITEK 1	ODLITEK 2	ODLITEK 3	ODLITEK 4
Průměrná hodnota tvrdosti v oblasti vtoku			
120,25	115,25	117,5	117,5
Průměrná hodnota tvrdosti proti oblasti vtoku			
119,25	117,5	118,5	117,75
Celková průměrná hodnota v oblasti vtoku			
117,68			
Celková průměrná hodnota proti oblasti vtoku			
118,25			



Obr.3.11 Grafická závislost průměrné hodnoty tvrdosti dle Brinella na dotlaku

Na obrázku 3.11 jsou znázorněny grafické závislosti tvrdosti na dotlacích v oblasti vtoku a proti vtoku odlitku. Z naměřených hodnot a grafické analýzy vyplývá, že průměrná tvrdost v místě vtoku i v místě proti vtoku s rostoucím dotlakem v plnicí komoře nepatrně roste. S rostoucím dotlakem dochází k zjemnění zrn struktury odlitku a zlepšení mechanických vlastností (tvrdost odlitku se zvyšuje).

Rozdíl naměřených hodnot v místě vtoku a v místě proti vtoku je způsoben odlišnou rychlostí krystalizace taveniny. V oblasti proti vtoku dochází k vyšší rychlosti odvodu tepla formou a tedy k rychlejší krystalizaci odlitku.

4. Diskuze výsledků

Naměřené a výsledné hodnoty v této diplomové práci informují o vlivu dotlaku vyvozeného pístem tlakového liciho stroje na strukturu slitiny AlSi12Cu . Struktura byla pozorována v jednotlivých oblastech odlitku a vyhodnocována pomocí softwaru LUCIA, viz obr.3.3. Dále byla experimentální část zaměřena na změny mechanických vlastností (meze pevnosti v tahu, tvrdosti) struktury odlitku při stoupajících dotlacích v tlakovém válci stroje.

1) Charakteristika struktury odlitku

Softwarem LUCIA jsem vyhodnocoval ve struktuře celkový podíl fáze alfa a ekvivalentní průměr primární fáze alfa, viz obr.3.4, 3.5 a), 3.5 b). Tyto údaje byly analyzovány v oblastech vtokové soustavy a v oblastech dutiny formy (v místě vtoku a v místě proti vtoku taveniny).

Výsledky naměřených hodnot a jejich grafické závislosti jsou ovlivněny podmínkami, které jsou charakteristické pro vysokotlaké lití. Krystalizace vysokotlakého odlitku není ovlivněna pouze působícím tlakem, ale také vysokou akumulací schopností kovové formy, což se v konečném důsledku projevuje tím, že lineární rychlost růstu zárodků převyšuje rychlost jejich tvorby [7], růstem teploty taveniny způsobenou vysokou rychlostí pístu a přeměny kinetické energie v teplo vlivem tření taveniny v plnicím válci tlakového stroje, chlazením pístu, které má vliv na rychlost tuhnutí odlitku ve vtokové soustavě odlitku.

Teoretický předpoklad pro sledování krystalizace by měl vycházet z optimálních podmínek, které by tyto okolnosti eliminovali. Řada odborníků (Grígerová – Greguš – Kozel [7], Dzugas – Vilčko – Batyšev [8]) ve svých vědeckých publikacích sledovali vliv tlaku působícího při krystalizaci na změny v soustavě Al-Si . Krystalizace byla pozorována na válcovém odlitku, vyrobeném lisováním taveniny na tvářecím stroji.

Při krystalizaci těchto masivních odlitků byla do jisté míry eliminována ochlazovací schopnost slévárenské formy. Struktura obsahovala téměř dendritickou strukturu, což u vysokotlakého lití není typické. U takto tvarově jednoduchých odlitků se při lisování neprojevuje turbulentní proudění, které v různých místech

odlitku způsobuje odlišnou strukturu a vady odlitku. Odlitky byly lisované tlaky řádově 10x většími než odlitky odlévané v této diplomové práci, což způsobuje nepatrný posun eutektické koncentrace k vyšším obsahům Si a tím i nepatrný růst obsahu tuhého roztoku fáze alfa. Vlivem odlišných podmínek v některých oblastech hodnoty podílu tuhého roztoku fáze alfa klesají.

Ekvivalentní průměr primární fáze alfa se zmenšuje s rostoucím dotlakem, což koresponduje s výsledky prací řad odborníků [7,8]. S rostoucím tlakem je krystalická struktura jemnozrnější.

2) Charakteristika výsledků zkoušky tahem

Pro měření meze pevnosti byl použit trhací stroj HOUNSFIELD H10KT. Omezenou velikostí ploch odlitků bylo možné odebrat z každé pouze dvě zkušební tyčky určené pro vyhodnocování meze pevnosti v tahu. Odlitky byly odlity jako tenkostěnné a průřez zkušebních tělísek, které byly odebrané ze dna odlitku se pohyboval v rozmezí $1,6 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$.

Obor naměřených hodnot vykazoval rozptyl pro tlak **10 MPa** od 150,48 MPa do 259,36 MPa, pro tlak **35 MPa** od 157,41 MPa do 274,81 MPa, pro tlak **120 MPa** od 149,09 MPa do 285,01 MPa. Různorodost hodnot mohla být způsobena vlivem porezity odlitku vznikající vlivem turbulentních proudů strhávajících do taveniny vzduch a plyny z dutiny formy, což je typické pro vysokotlaké liti.

Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu se s rostoucími dotlaky mírně zvyšovaly. Tyto hodnoty odpovídají mým teoretickým předpokladům, získaných studiím z dostupných literatur.

3) Charakteristika výsledků zkoušky tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti byla provedena na tvrdoměru WPM – 308 v oblasti vtoku odlitku a v oblasti proti vtoku odlitku. Aby výsledky byly co nejméně ovlivněné zkouška byla provedena za optimálních podmínek, které byly do značné míry shodné s podmínkami, které jsou uvedeny v normě ČSN 42 0371.

Hodnoty tvrdosti byly získané z výpadů odlitých odlišnými dotlaky 10 MPa, 35 MPa, 120 MPa a po jejich přepočítání na průměrné hodnoty bylo zjištěno, že hodnoty (114,75 HB, 116,687 HB, 117,68 HB) v místě proti vtoku jsou nepatrně vyšší než hodnoty (116,375 HB, 117,75 HB, 118,25 HB) v místě vtoku, což mohlo

být způsobeno rozdílnou efektivitou odvodu tepla formou nebo turbulencí proudu taveniny, který vytváří v odlitku rozmanitou strukturu.

Průměrné hodnoty tvrdosti opět s rostoucím dotlakem mírně vzrůstaly, příčinou růstu hodnot je vznik jemnější struktury odlitku.

Závěrem bych zdůraznil, že výsledná jemnozrná struktura při dotlaku 120 MPa má lepší mechanické vlastnosti než struktura s hrubší zrnitostí odlitku litého při dotlaku 10 MPa. Výsledky plně odpovídají studiím mechanických vlastností v odborných literaturách [11].

5. Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo sledování krystalizace odlitků litých pod tlakem. Diplomová práce obsahuje:

Teoretickou část, zde je detailně popsána problematika krystalizace slitin hliníku, vnitřní atomová struktura hliníku, popis tlakových licích strojů, tlakové lití, licí cyklus horizontálního tlakového stroje se studenou komorou. Dále jsou zde popsány slitiny hliníku, jejich příprava (tavicí agregáty, rafinace) a technologické vlastnosti slitin hliníku.

Experimentální část, zde je zpracována analýza krystalizace slitiny AlSi12Cu v závislosti na velikosti dotlaku vyvozeného horizontálním tlakovým licím strojem se studenou komorou TOS TL5 – 630/750. Analýza byla zaměřena na vyhodnocování množství fáze alfa a na vyhodnocování velikosti částic primární fáze alfa. K měření a vyhodnocování se osvědčil světelný mikroskop NIKON Epiphot 200 se softwarem LUCIA. Hodnoty ekvivalentního průměru primární fáze alfa se snižovaly s rostoucím dotlakem skoro ve všech pozorovaných oblastech odlitku, výsledkem je jemnozrnná struktura. Nejvíce se zvětšení podílu fáze alfa s rostoucím dotlakem projevovalo v místech odlitku B,C ve vtokové soustavě.

Dále byly sledovány a vyhodnocovány hodnoty mechanických vlastností (mez pevnosti v tahu a tvrdost). Průměrné hodnoty meze pevnosti jsou 211,39 MPa (dotlak 10 MPa), 224,75 MPa (dotlak 35 MPa), 232,9 (dotlak 120 MPa) a střední hodnoty tvrdosti na ploše odlitku jsou 115,562 HB pro dotlak 10 MPa, 117,218 HB pro dotlak 35 MPa, 117,965 HB pro dotlak 120 MPa. Výsledné hodnoty mechanických vlastností s rostoucím dotlakem mírně rostou.

Z důvodů, že se jedná o základní výzkum sledované problematiky vlivu tlaku na strukturu a mechanické vlastnosti odlitků ze slitin hliníku nebylo provedeno ekonomické hodnocení.

Pro další výzkum v této oblasti doporučuji se zaměřit na problematiku krystalizace slitin hliníků odlitých s širší tloušťkou stěny odlitku. Analyzovat více odlitků vyrobených větším množstvím dotlaků. Dotlaků jejichž obor hodnot by obsahoval tlaky menší, kde by byl podíl fáze alfa zastoupen v menším množství a nebo naopak

tlaky vyšších hodnot, kde by byl podíl fáze alfa zastoupen ve větší míře. Dále bych se zaměřil na výběr většího počtu vzorků z různých oblastí jednotlivých výpadů.

Nebo vytvořit takové podmínky, které by eliminovaly zásah do krystalizace odlitku.

Další řešení by mohlo být odlévat odlitky jinou metodou, jako je například lisování kovu na hydraulickém tvářecím lisu, kde krystalizace není v tak velké míře ovlivněna okolními podmínkami. Tato technologie je publikována v pracích (Grígerová – Greguš - Kozel [7], Dzugas – Vilčko – Batyšev [8]).

Seznam použité literatury

- [1] PTÁČEK, L.: Slitiny hliníku na odlitky. Slévárství XLVII, 1999, č.1, s.1 až 13
- [2] KOPLÍK, R.: Výroba odlitků ze slitin hliníku. Slévárství LIII, 2005, č.2/3, s. 90 až 93
- [3] GRÍGEROVÁ, T., GRÚTKOVÁ, J., BEHÁŇ, B.: Štruktúra doeutektického silumínu stuhnutého pod tlakom. Slévárství XXXX, 1992, č.4, s. 149 až 153
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ: Příručka o hliníku. 1.vid., Praha 1969
- [5] MICHNA., ŠTEFAN: Encyklopedie hliníku. ADIN Prešov 2005
- [6] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu II. ACADEMIKA Praha 1966
- [7] GRÍGEROVÁ, T., GREGUŠ, D., KOZEL, Š.: Príspevok k štúdiu štruktúry doeutektického silumínu stuhnutého pri pôsobení tlaku. Sborník z vědecké konference. VŠB Ostrava 1990 s. 210 až 216
- [8] DZUGAS, P., VILČKO, J., BATYŠEV, A.: Zvláštnosti tuhnutia odliatkov zo zlatin typu Al-Si liatých s tuhnutím pod tlakom (II. časť). Slévárství XXXIX, 1991, č. 3/4, s. 107 až 116
- [9] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 1. vyd., Praha 1972
- [10] VILČKO, J., SLOVÁK, S.: Zlievarenska technologia. 1. vyd., ALFA Bratislava 1987
- [11] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 2. vyd., SNTL Praha 1989

Prohlášení

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

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

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu užití, 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interferon in my copyright by use of my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has he right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 26.5.2006

Signature:





PŘÍLOHY

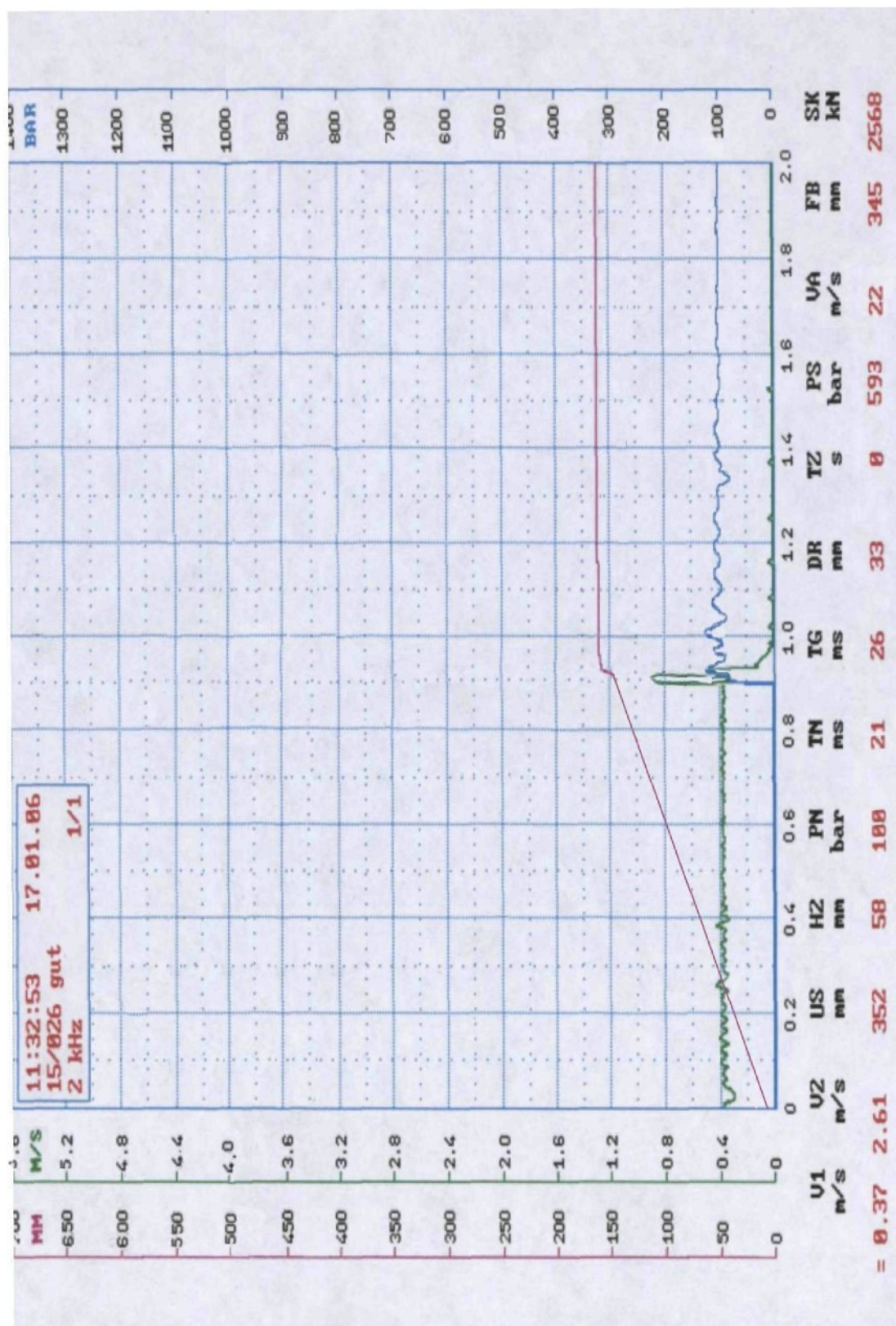
Příloha č.1: Záznamy průběhů licích parametrů při dotlaku 10, 35, 120 MPa

Příloha č.2: Přehled metalografických vzorků

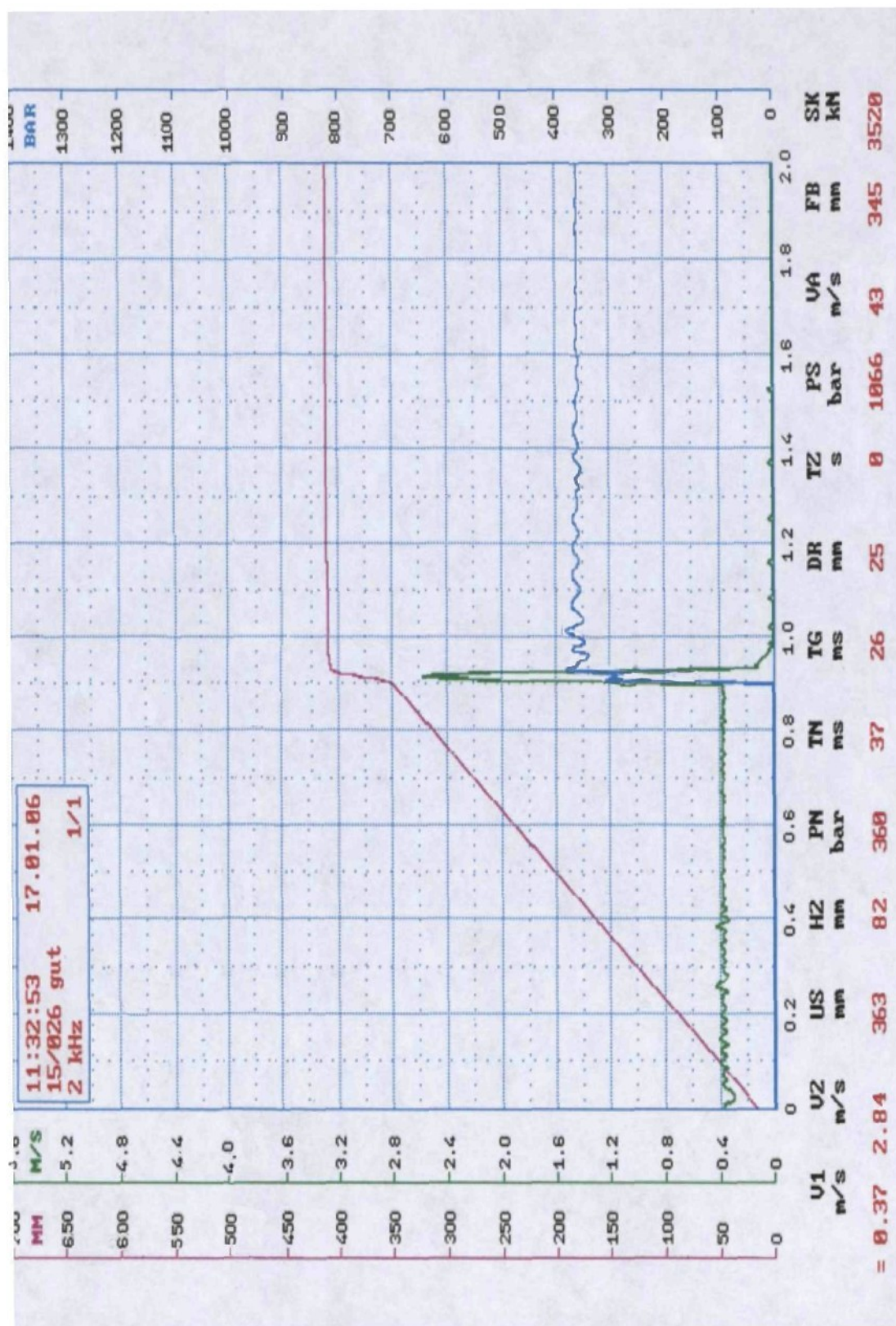
Příloha č.3: Přehled vyhodnocovaných struktur

Příloha č.4: Ukázka hodnot sledovaných struktur

Příloha č.1



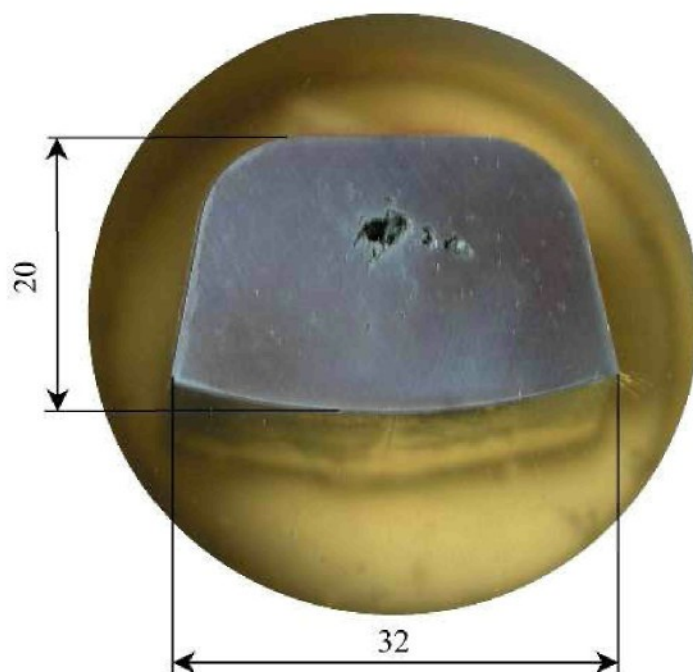
Obr.1.1 Záznam licích parametrů při dotlaku 10 MPa přístrojem Electronics



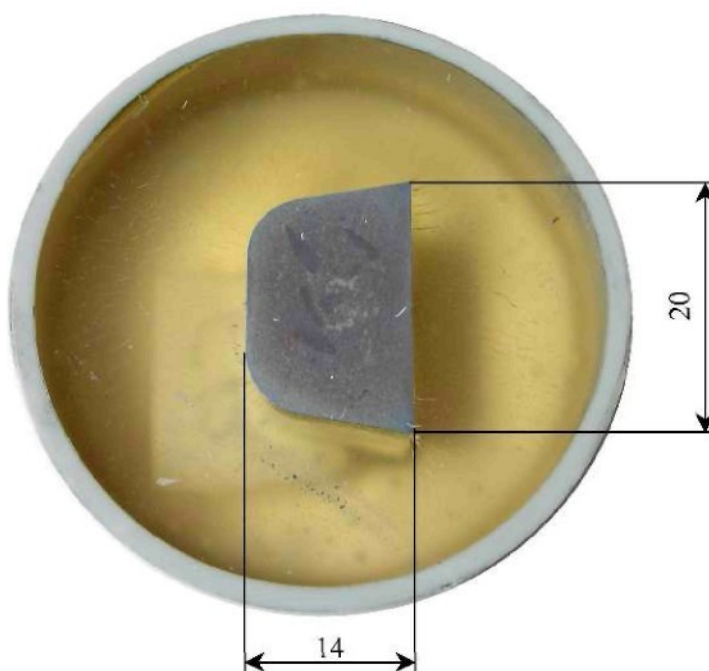
Obr.1.2 Záznam licích parametrů při dotlaku 35 MPa přístrojem Electronics

Příloha č.2

VZOREK A

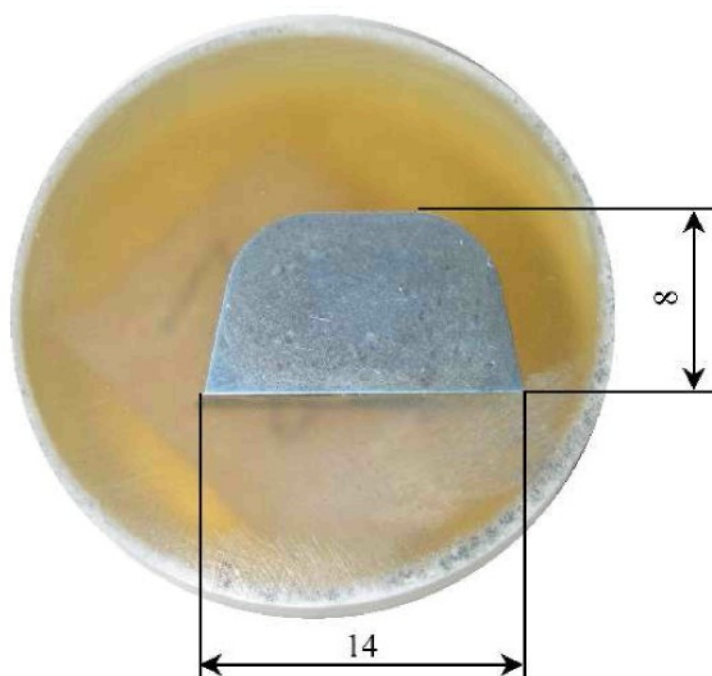


VZOREK B

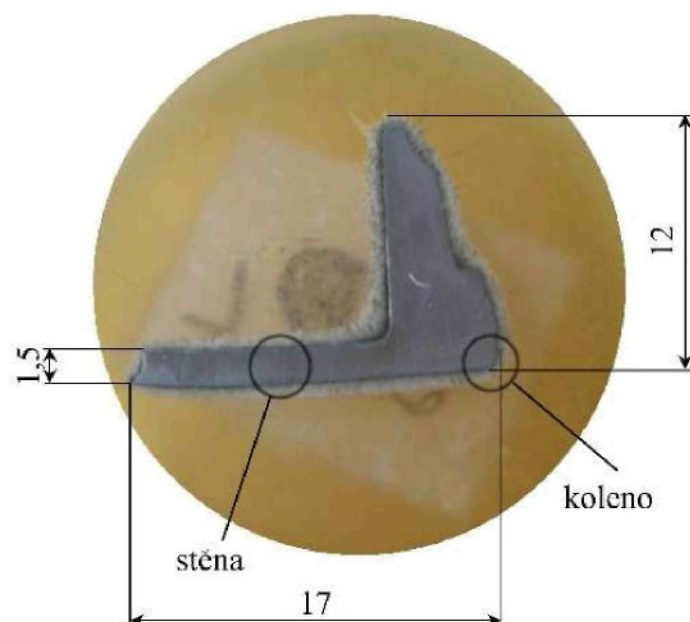


Obr.2.1 Přehled metalografických výbrusů a jejich charakteristické rozměry

VZOREK C

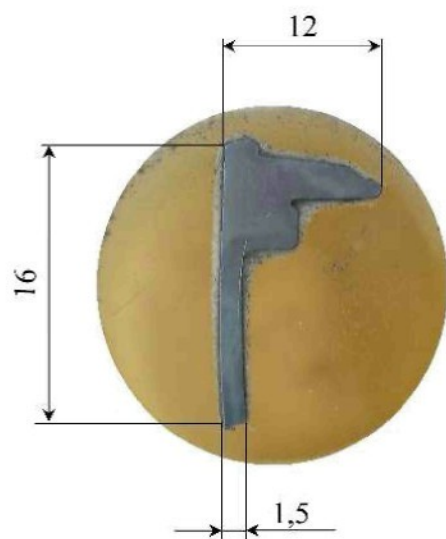


VZOREK D



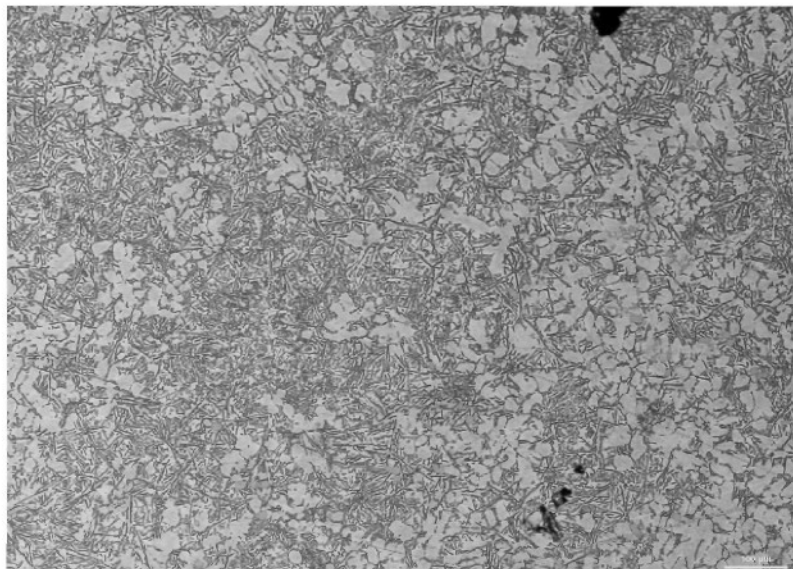
Obr. 2.2 Přehled metalografických výbrusů a jejich charakteristické rozměry

VZOREK E

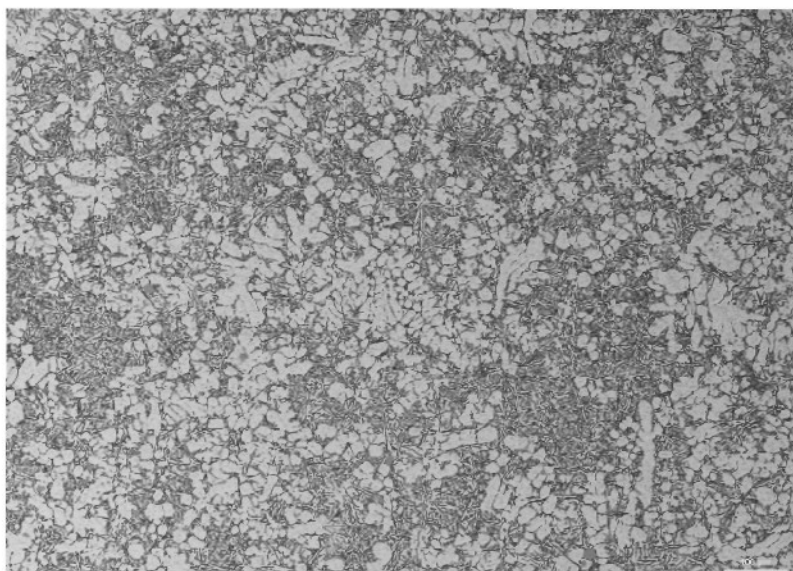


Obr.2.3 Přehled metalografických výbrusů a jejich charakteristické rozměry

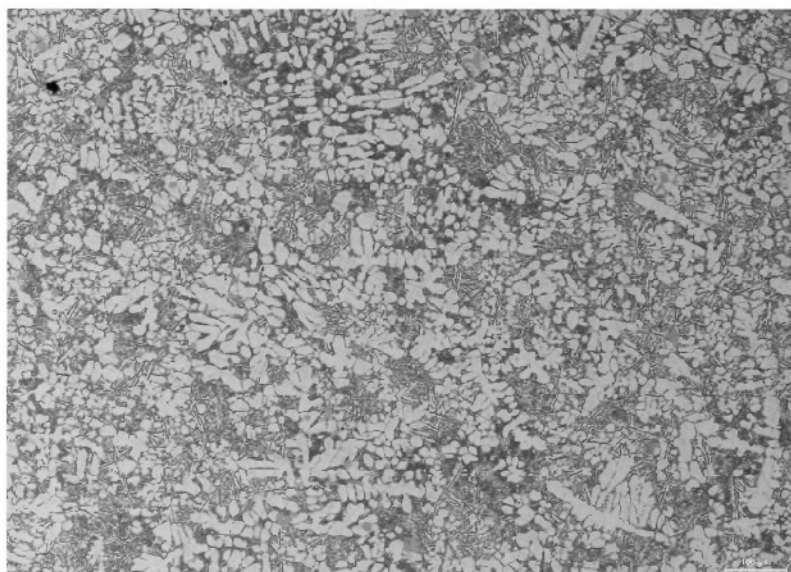
Příloha č. 3



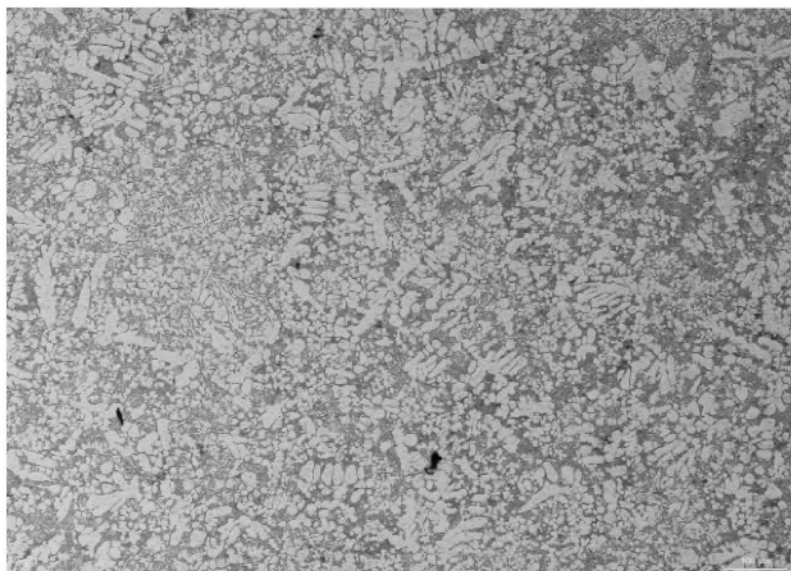
Obr. P 1 Vzorek 4.A – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



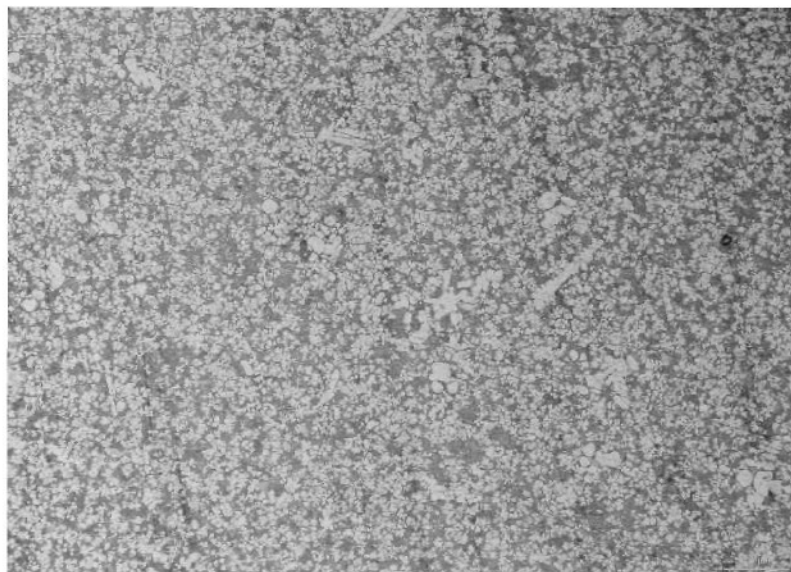
Obr. P 2 Vzorek 4.B – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



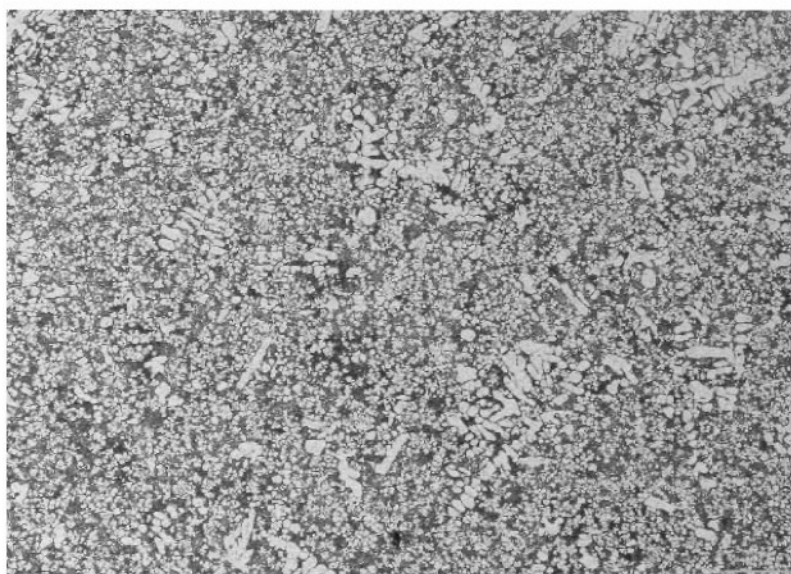
Obr. P 3 Vzorek 4.C – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



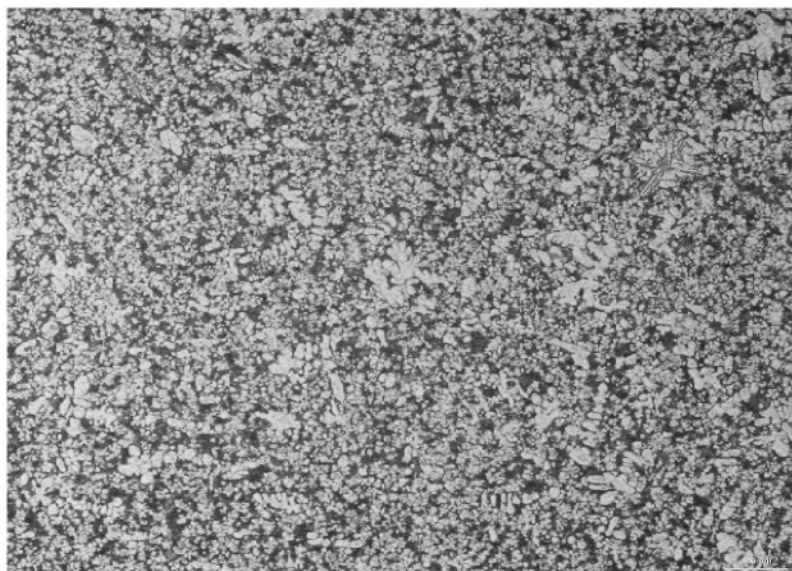
Obr. P 4 Vzorek 4.D1 – leptáno 0,5 % HF - dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



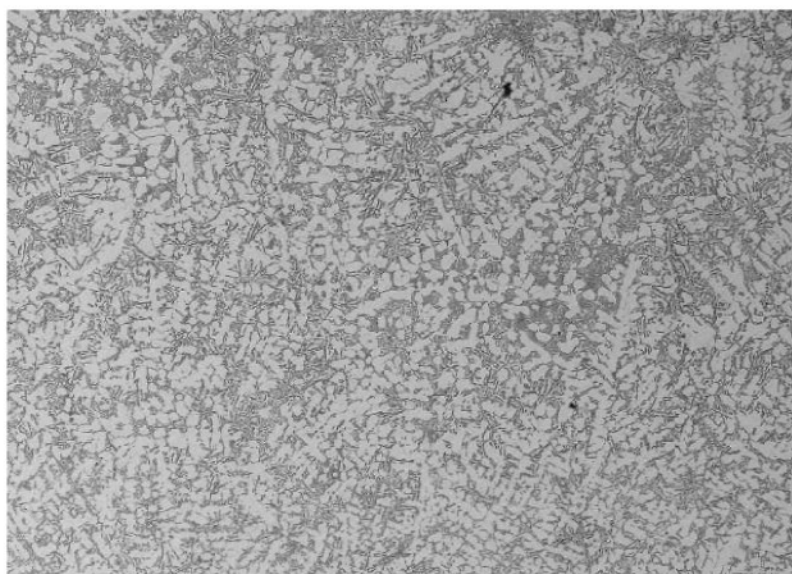
Obr. P 5 Vzorek 4.D2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



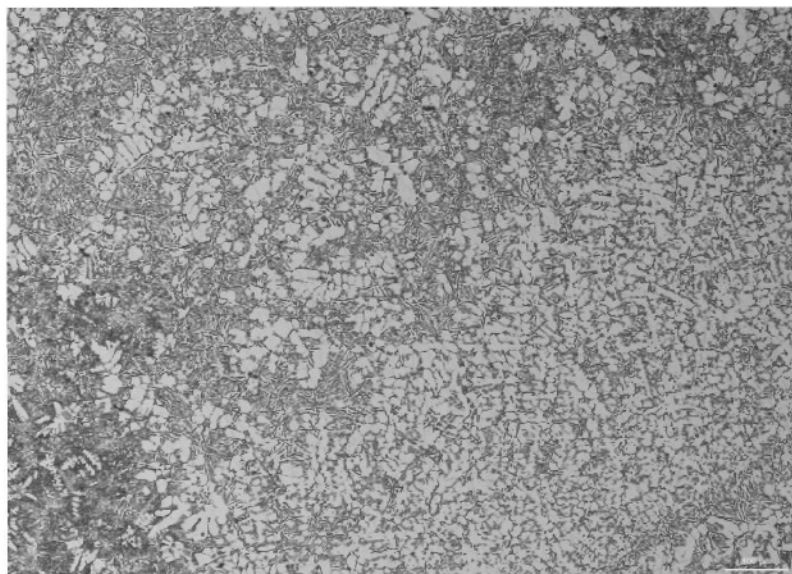
Obr. P 6 Vzorek 4.E1 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



Obr. P 7 Vzorek 4.E2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 10 MPa,
100x zvětšení



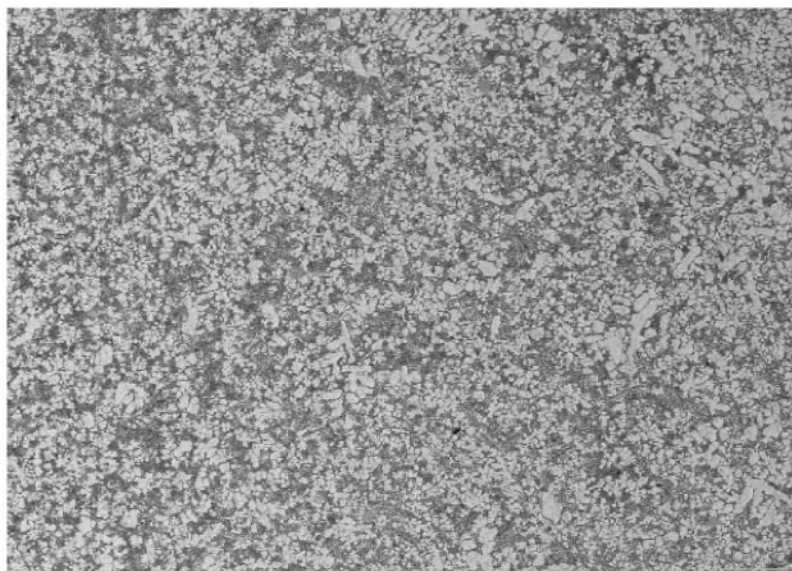
Obr. P 8 Vzorek 5.A – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



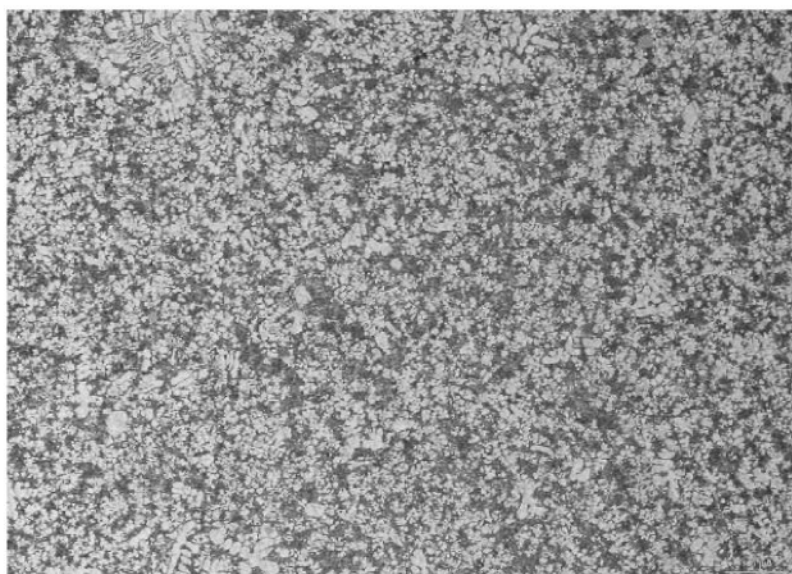
Obr. P 9 Vzorek 5.B – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



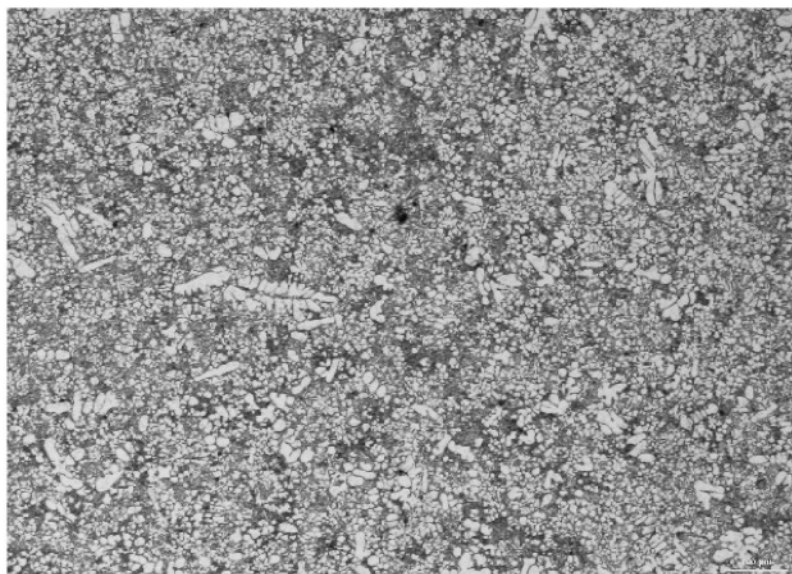
Obr. P 10 Vzorek 5.C – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



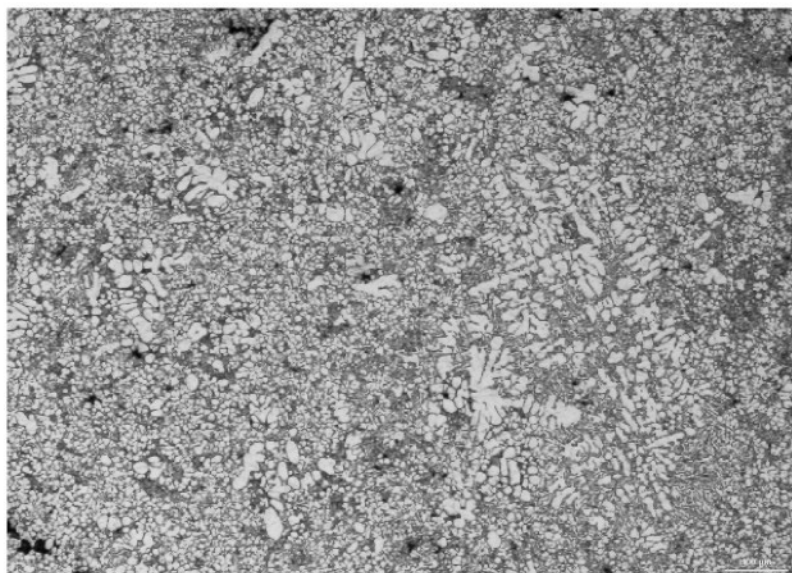
Obr. P 11 Vzorek 5.D1 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



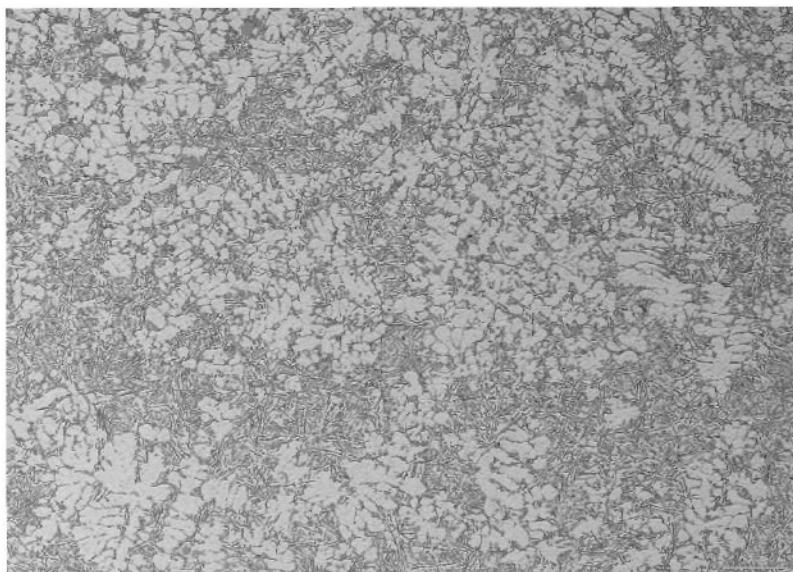
Obr. P 12 Vzorek 5.D2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



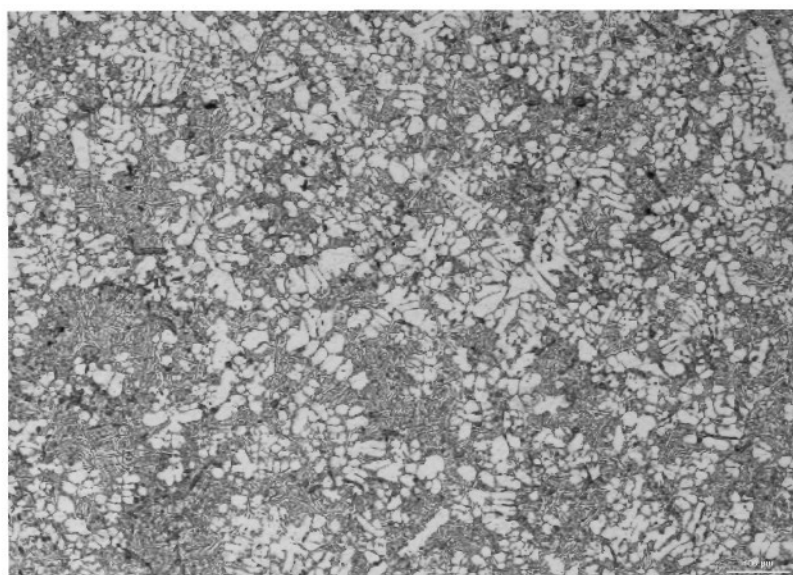
Obr. P 13 Vzorek 5.E1 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



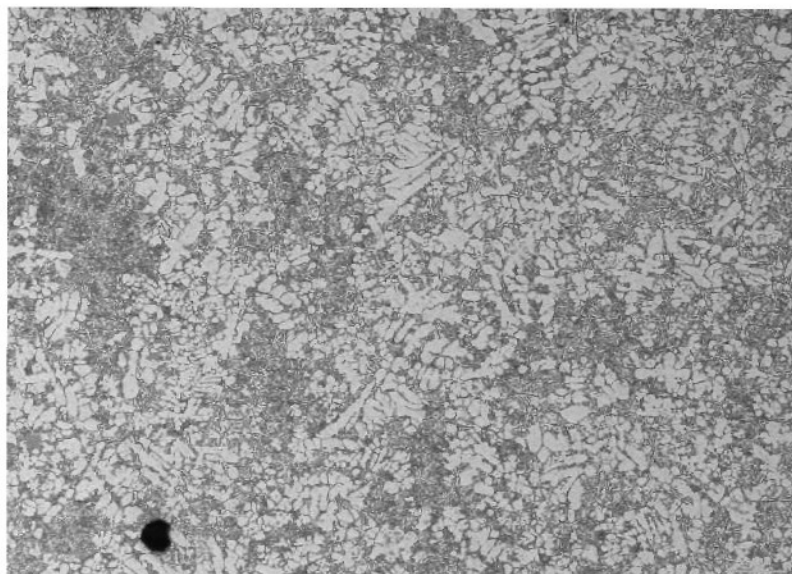
Obr. P 14 Vzorek 5.E2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 35 MPa,
100x zvětšení



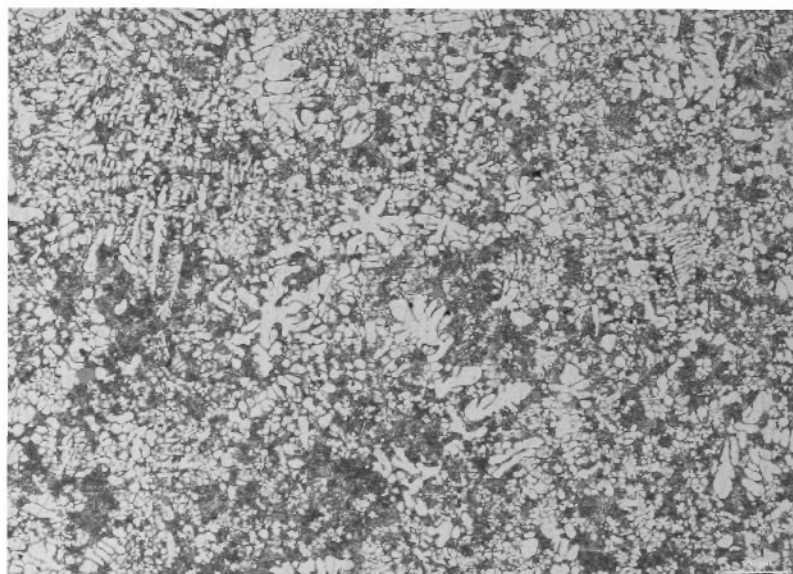
Obr. P 15 Vzorek 6.A – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



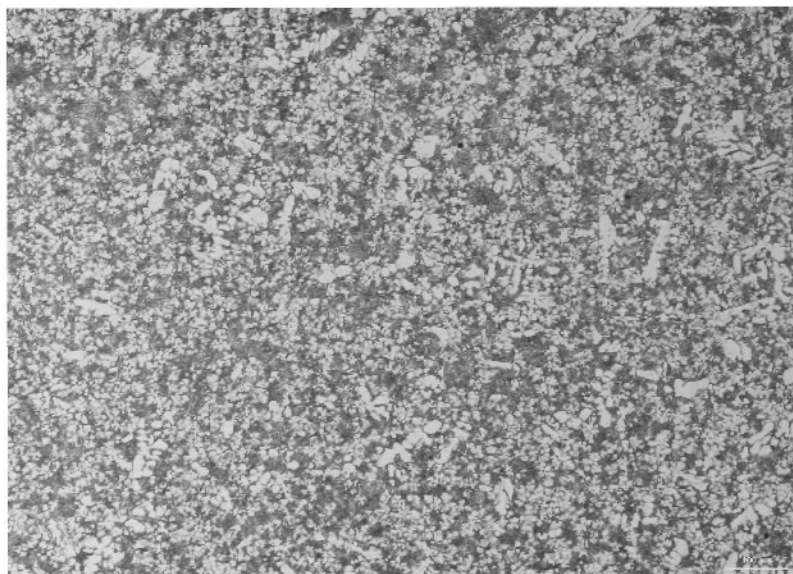
Obr. P 16 Vzorek 6.B – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



Obr. P 17 Vzorek 6.C – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



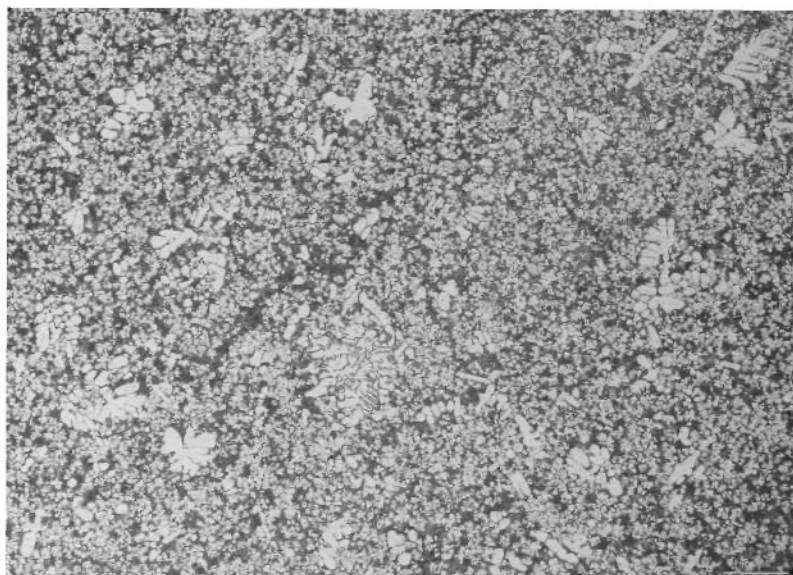
Obr. P 18 Vzorek 6.D1 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



Obr. P 19 Vzorek 6.D2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



Obr. P 20 Vzorek 6.E1 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení



Obr. P 21 Vzorek 6.E2 – leptáno 0,5 % HF – dotlak 120 MPa,
100x zvětšení

Příloha č.4

Tab.1.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 A pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	1089.35	37.24	59.79	28.23	186.46
2.	2287.64	53.97	82.48	48.25	329.73
3.	2367.71	54.91	113.65	46.96	385.91
4.	774.65	31.41	39.03	29.91	147.24
5.	718.79	30.25	40.75	30.58	135.50
6.	1439.44	42.81	68.28	33.45	227.95
7.	1485.99	43.50	61.72	35.82	200.02
8.	594.02	27.50	37.74	27.88	126.89
9.	1258.81	40.03	47.30	40.54	180.53
10.	1380.78	41.93	49.45	43.97	177.53
11.	566.09	26.85	35.48	26.34	119.04
12.	1304.43	40.75	63.53	31.22	169.10
13.	4104.16	72.29	102.78	87.46	532.24
14.	1698.27	46.50	65.84	41.27	249.72
15.	796.07	31.84	41.55	31.97	131.94
16.	661.99	29.03	34.00	27.98	97.27
17.	688.06	29.60	40.52	28.20	123.10
18.	1202.94	39.14	57.90	36.67	239.68
19.	296.08	19.42	24.46	16.18	68.27
20.	374.29	21.83	31.17	22.14	94.01
21.	771.86	31.35	37.58	33.92	135.95
22.	848.21	32.86	44.39	29.91	153.93
23.	537.23	26.15	39.58	23.20	115.25
24.	499.05	25.21	37.18	21.07	109.00
25.	649.89	28.77	42.86	24.42	127.96
26.	999.97	35.68	50.17	32.94	150.40
27.	2053.01	51.13	76.23	45.62	247.54
28.	752.31	30.95	43.00	30.36	134.53
29.	2336.06	54.54	74.82	51.39	331.59
30.	3954.26	70.96	101.51	72.39	539.65

Tab.1.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	1283.05	930.96	296.08	4104.16
ekv. průměr [μm]	38.28	12.97	19.42	72.29
max rozměr [μm]	54.82	22.19	24.46	113.65
min rozměr [μm]	36.01	14.53	16.18	87.46
obvod [μm]	198.93	116.29	68.27	539.65

Tab.2.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 A pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	1132.50	37.97	55.50	33.70	172.30
2.	585.84	27.31	37.74	23.50	109.11
3.	416.99	23.04	30.45	21.25	88.61
4.	427.25	23.32	27.87	21.46	77.84
5.	444.04	23.78	28.44	21.41	80.66
6.	994.44	35.58	45.10	36.25	141.04
7.	452.44	24.00	28.01	22.21	85.39
8.	745.36	30.81	38.25	32.09	133.49
9.	293.85	19.34	22.56	18.35	63.29
10.	533.60	26.07	32.65	23.20	96.29
11.	964.58	35.04	53.66	32.29	148.36
12.	764.95	31.21	36.71	30.34	122.37
13.	667.93	29.16	42.06	27.16	111.48
14.	1148.36	38.24	47.72	36.18	159.80
15.	576.51	27.09	33.65	28.98	120.23
16.	611.96	27.91	35.86	25.16	110.40
17.	616.62	28.02	35.52	25.11	97.23
18.	395.54	22.44	27.87	20.82	88.74
19.	709.91	30.06	35.96	29.22	110.53
20.	558.79	26.67	39.02	24.82	114.82
21.	503.75	25.33	33.36	25.27	104.91
22.	369.42	21.69	26.48	23.18	81.73
23.	696.85	29.79	38.75	25.55	111.16
24.	470.16	24.47	35.86	18.35	96.92
25.	521.47	25.77	35.10	20.30	99.51
26.	358.22	21.36	27.24	20.02	75.57
27.	876.89	33.41	48.91	28.01	131.08
28.	943.13	34.65	48.64	33.56	173.15
29.	459.90	24.20	30.53	22.21	87.22
30.	685.66	29.55	43.72	22.85	116.12

Tab.2.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	630.90	226.28	293.85	1148.36
ekv. průměr [μm]	28.91	4.93	19.34	38.24
max rozměr [μm]	36.77	8.22	22.56	55.50
min rozměr [μm]	25.76	5.11	18.35	36.25
obvod [μm]	110.31	27.60	63.29	173.15

Tab.3.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 A pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	1126.32	37.87	56.10	30.39	168.64
2.	1134.76	38.01	49.47	38.49	161.29
3.	607.71	27.82	35.08	27.85	110.38
4.	507.36	25.42	35.21	20.96	96.32
5.	1206.97	39.20	58.19	30.32	184.31
6.	1541.77	44.31	54.58	42.30	186.59
7.	1116.94	37.71	46.31	38.74	168.73
8.	418.27	23.08	30.47	21.11	95.24
9.	947.20	34.73	56.18	27.33	147.24
10.	726.81	30.42	44.11	24.13	126.59
11.	633.96	28.41	34.79	27.31	109.84
12.	959.39	34.95	49.94	30.18	161.92
13.	630.21	28.33	36.48	26.66	116.96
14.	445.46	23.82	29.20	25.78	94.48
15.	689.30	29.62	36.07	29.09	105.50
16.	413.58	22.95	27.04	21.72	83.24
17.	1279.18	40.36	50.39	37.73	176.52
18.	509.24	25.46	30.24	25.22	92.33
19.	586.14	27.32	32.58	27.55	102.59
20.	1019.41	36.03	49.47	35.19	162.06
21.	403.26	22.66	27.75	21.52	82.04
22.	461.41	24.24	29.12	23.35	85.49
23.	694.92	29.75	38.74	28.64	114.59
24.	414.52	22.97	29.20	19.78	83.78
25.	1023.16	36.09	43.59	34.86	131.78
26.	449.21	23.92	29.17	22.96	81.41
27.	737.12	30.64	41.51	28.92	120.41
28.	477.35	24.65	31.97	23.08	95.47
29.	464.22	24.31	32.63	20.34	92.43
30.	701.49	29.89	42.89	27.11	136.76

Tab.3.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	744.22	308.17	403.26	1541.77
ekv. průměr [μm]	30.16	6.14	22.66	44.31
max rozměr [μm]	39.62	9.62	27.04	58.19
min rozměr [μm]	27.95	5.91	19.78	42.30
obvod [μm]	122.50	33.78	81.41	186.59

Tab.4.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 B pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	573.95	27.03	33.38	26.34	104.48
2.	585.36	27.30	33.27	24.95	94.25
3.	1132.70	37.98	51.86	30.43	163.89
4.	869.48	33.27	42.33	31.25	135.05
5.	477.98	24.67	31.43	23.58	96.42
6.	694.64	29.74	38.03	27.86	111.11
7.	682.28	29.47	42.35	23.05	112.51
8.	468.48	24.42	31.08	22.80	89.88
9.	1143.16	38.15	56.11	34.00	179.85
10.	439.02	23.64	28.89	24.16	91.95
11.	976.86	35.27	44.45	32.37	163.89
12.	1190.67	38.94	63.37	28.18	166.15
13.	776.36	31.44	38.94	27.57	115.35
14.	770.66	31.32	39.99	26.56	116.75
15.	863.78	33.16	44.14	30.64	135.49
16.	1721.86	46.82	67.70	41.37	213.29
17.	893.24	33.72	43.78	31.11	147.13
18.	642.37	28.60	37.88	23.95	121.66
19.	405.76	22.73	28.28	23.18	88.89
20.	854.28	32.98	54.59	23.19	137.79
21.	873.28	33.35	57.39	20.51	149.70
22.	959.76	34.96	48.93	28.94	135.36
23.	635.72	28.45	36.67	28.44	118.28
24.	1019.62	36.03	56.43	26.70	173.71
25.	425.71	23.28	31.95	20.29	97.91
26.	401.96	22.62	31.07	21.69	91.95
27.	564.45	26.81	33.86	25.56	104.03
28.	1089.94	37.25	61.42	29.41	163.44
29.	382.00	22.05	27.49	21.41	81.95
30.	468.48	24.42	31.24	25.01	100.11

Tab.4.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	766.13	301.38	382.00	1721.86
ekv. průměr [μm]	30.66	5.94	22.05	46.82
max rozměr [μm]	42.28	11.38	27.49	67.70
min rozměr [μm]	26.82	4.50	20.29	41.37
obvod [μm]	126.74	32.65	81.95	213.29

Tab.5.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 B pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	462.14	24.26	33.28	22.67	93.61
2.	780.86	31.53	43.15	30.92	131.85
3.	362.78	21.49	29.20	19.32	79.78
4.	987.09	35.45	51.51	36.04	185.57
5.	352.47	21.18	24.40	21.16	73.60
6.	597.13	27.57	42.64	22.87	111.75
7.	358.09	21.35	32.58	15.88	79.24
8.	1308.63	40.82	56.45	33.71	176.52
9.	660.87	29.01	36.16	28.97	108.30
10.	1258.01	40.02	59.58	32.37	173.48
11.	813.67	32.19	46.76	26.14	131.31
12.	339.34	20.79	24.28	21.39	72.21
13.	531.51	26.01	30.09	26.31	94.37
14.	1020.84	36.05	47.80	37.78	164.62
15.	347.78	21.04	23.49	21.77	74.14
16.	848.36	32.87	36.21	33.06	119.98
17.	509.95	25.48	32.62	23.64	102.03
18.	424.65	23.25	27.75	20.33	83.89
19.	404.02	22.68	30.79	22.79	91.42
20.	459.33	24.18	33.44	22.65	97.60
21.	450.89	23.96	27.89	23.53	90.16
22.	516.51	25.64	30.59	24.04	87.97
23.	684.31	29.52	47.54	31.85	153.03
24.	337.47	20.73	24.88	20.46	83.76
25.	565.26	26.83	36.91	27.81	110.36
26.	1339.56	41.30	55.54	38.36	190.00
27.	441.52	23.71	32.73	23.71	99.53
28.	1057.40	36.69	53.69	30.60	178.54
29.	971.16	35.16	52.61	32.17	157.05
30.	932.72	34.46	52.80	30.94	176.30

Tab.5.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	670.81	306.59	337.47	1339.56
ekv. průměr [μm]	28.51	6.43	20.73	41.30
max rozměr [μm]	38.58	10.99	23.49	59.58
min rozměr [μm]	26.77	5.81	15.88	38.36
obvod [μm]	119.07	38.56	72.21	190.00

Tab.6.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 B pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	1125,46	36,25	58,12	28,33	186,11
2.	1833,26	45,97	82,48	33,20	212,84
3.	774,65	63,15	113,65	42,02	379,56
4.	890,32	35,88	39,03	33,54	614,32
5.	650,11	26,33	40,75	18,63	135,62
6.	485,25	48,10	68,28	36,09	387,14
7.	570,32	27,52	61,72	18,25	127,95
8.	848,21	43,22	63,22	36,84	150,63
9.	715,32	26,88	47,30	17,99	280,74
10.	920,92	31,96	49,45	23,65	163,10
11.	1230,80	48,33	56,87	30,15	119,04
12.	380,14	69,36	80,14	58,51	169,10
13.	686,25	33,68	52,30	24,63	132,24
14.	418,12	25,33	35,86	20,69	149,72
15.	1340,62	55,25	71,55	41,97	331,94
16.	540,18	28,95	34,00	27,98	97,27
17.	833,15	41,21	58,05	30,02	123,10
18.	960,43	43,20	57,90	36,67	235,68
19.	777,01	38,63	45,21	32,74	168,27
20.	612,06	23,97	31,17	22,14	130,01
21.	514,38	19,35	28,09	16,62	111,95
22.	580,92	22,52	44,39	20,30	113,93
23.	350,08	17,14	21,56	15,99	78,25
24.	2156,04	55,99	71,33	48,01	402,00
25.	1004,57	41,10	42,86	38,63	150,96
26.	805,48	43,21	50,17	32,94	141,40
27.	750,63	39,14	66,23	45,62	120,54
28.	818,78	42,5	48,00	35,36	134,53
29.	440,32	16,20	24,82	11,89	96,59
30.	503,28	18,52	23,95	15,26	103,65

Tab.6.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	615,46	209,14	296,08	350,08
ekv. průměr [μm]	27,06	4,66	16,20	69,36
max rozměr [μm]	35,14	9,84	21,56	82,48
min rozměr [μm]	25,23	14,53	11,89	58,51
obvod [μm]	113,96	34,62	78,25	614,32

Tab.7.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 C pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	688.80	29.61	40.89	25.42	113.63
2.	891.77	33.70	47.76	26.05	130.71
3.	1133.28	37.99	48.65	34.81	171.41
4.	648.39	28.73	40.51	24.95	110.04
5.	1088.17	37.22	44.81	39.12	147.92
6.	849.49	32.89	41.74	30.05	115.24
7.	752.70	30.96	43.06	27.25	123.04
8.	479.25	24.70	32.53	20.09	86.78
9.	548.78	26.43	32.54	23.91	95.34
10.	713.23	30.13	38.38	30.79	145.01
11.	807.20	32.06	40.72	31.32	129.54
12.	856.06	33.01	48.51	26.56	124.66
13.	961.31	34.99	48.32	34.49	170.02
14.	409.71	22.84	33.87	20.92	95.02
15.	588.25	27.37	38.12	27.66	113.72
16.	500.86	25.25	42.66	15.82	97.27
17.	519.65	25.72	32.97	26.00	99.91
18.	514.95	25.61	30.45	23.27	89.92
19.	1322.15	41.03	59.66	35.13	178.13
20.	794.04	31.80	47.43	25.33	133.53
21.	945.34	34.69	44.52	33.88	159.71
22.	751.76	30.94	43.55	26.38	146.31
23.	642.75	28.61	34.15	26.39	95.25
24.	529.99	25.98	38.72	20.34	108.34
25.	728.27	30.45	38.37	28.26	116.67
26.	729.21	30.47	36.25	29.18	112.87
27.	660.61	29.00	35.39	28.36	111.03
28.	458.57	24.16	32.72	20.36	86.24
29.	602.35	27.69	39.94	25.46	108.43
30.	657.79	28.94	36.11	28.38	109.51

Tab.7.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	725.82	210.23	409.71	1322.15
ekv. průměr [μm]	29.10	4.26	22.84	41.03
max rozměr [μm]	40.44	6.40	30.45	59.66
min rozměr [μm]	27.20	5.05	15.82	39.12
obvod [μm]	120.84	25.32	86.24	178.13

Tab.8.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 C pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	584.05	27.27	32.61	26.77	112.43
2.	465.17	24.34	30.19	23.31	90.55
3.	349.11	21.08	29.67	16.52	76.00
4.	678.41	29.39	39.49	24.32	114.62
5.	599.15	27.62	32.69	26.12	101.28
6.	747.28	30.85	41.09	32.96	135.11
7.	704.82	29.96	37.03	27.76	116.02
8.	275.51	18.73	22.80	17.32	64.95
9.	397.23	22.49	30.56	21.28	92.93
10.	308.54	19.82	24.06	19.41	70.38
11.	414.21	22.97	29.95	19.43	94.01
12.	487.81	24.92	29.21	24.46	84.13
13.	623.68	28.18	37.69	26.24	128.28
14.	345.34	20.97	30.56	18.76	83.94
15.	641.61	28.58	35.99	26.89	109.01
16.	1093.56	37.31	55.75	35.91	160.80
17.	2241.85	53.43	70.49	51.92	225.21
18.	334.96	20.65	28.32	20.63	90.33
19.	620.85	28.12	34.20	28.69	110.94
20.	412.33	22.91	30.90	19.17	90.64
21.	388.74	22.25	27.39	20.20	75.68
22.	1179.43	38.75	54.54	36.25	190.98
23.	360.43	21.42	25.00	20.21	70.92
24.	402.89	22.65	30.97	17.32	81.88
25.	611.41	27.90	41.91	21.57	108.34
26.	406.67	22.75	28.03	21.59	79.37
27.	455.73	24.09	33.14	22.54	93.47
28.	790.69	31.73	45.82	27.20	121.45
29.	354.77	21.25	25.74	20.99	78.60
30.	635.95	28.46	38.15	25.67	119.16

Tab 8.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	597.07	371.64	275.51	2241.85
ekv. průměr [μm]	26.69	6.90	18.73	53.43
max rozměr [μm]	35.13	10.20	22.80	70.49
min rozměr [μm]	24.71	7.12	16.52	51.92
obvod [μm]	105.71	34.96	64.95	225.21

Tab.9.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 C pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	473.78	24.56	32.76	18.44	88.18
2.	509.57	25.47	31.37	23.42	99.76
3.	392.78	22.36	28.76	19.90	79.75
4.	360.75	21.43	25.29	20.40	75.62
5.	584.93	27.29	38.72	21.91	100.12
6.	439.87	23.67	28.01	22.30	78.22
7.	429.51	23.39	31.43	22.32	86.66
8.	254.32	17.99	25.23	16.54	68.35
9.	337.20	20.72	28.45	19.44	82.98
10.	518.99	25.71	31.66	20.38	91.64
11.	264.68	18.36	24.58	16.16	65.65
12.	729.04	30.47	33.81	30.09	101.07
13.	597.17	27.57	33.01	28.02	105.42
14.	370.17	21.71	28.32	19.21	73.46
15.	374.88	21.85	28.78	18.78	77.01
16.	335.32	20.66	28.78	16.67	74.99
17.	292.93	19.31	24.94	20.11	74.54
18.	587.75	27.36	36.26	22.62	98.69
19.	515.22	25.61	33.81	24.62	98.82
20.	768.60	31.28	41.79	32.51	140.73
21.	1055.88	36.67	49.50	32.37	133.37
22.	395.60	22.44	28.42	19.97	78.44
23.	436.10	23.56	33.98	19.79	84.28
24.	452.12	23.99	30.44	23.84	96.21
25.	633.90	28.41	37.71	22.68	104.97
26.	474.72	24.59	29.92	25.23	94.47
27.	361.69	21.46	24.60	19.50	70.54
28.	471.90	24.51	29.27	23.62	88.63
29.	479.43	24.71	29.71	23.08	89.80
30.	457.77	24.14	31.29	21.94	94.37

Tab.9.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	478.55	162.04	254.32	1055.88
ekv. průměr [μm]	24.38	3.90	17.99	36.67
max rozměr [μm]	31.35	5.34	24.58	49.50
min rozměr [μm]	22.20	4.10	16.16	32.51
obvod [μm]	89.89	16.83	65.65	140.73

Tab.10.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 D1 pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [px ²]	ekv. průměr [px]	max rozměr [px]	min rozměr [px]	obvod [px]
1.	389.00	22.26	26.81	20.48	72.78
2.	658.00	28.94	34.42	28.86	106.82
3.	424.00	23.23	29.02	22.00	84.71
4.	368.00	21.65	27.87	21.69	84.06
5.	912.00	34.08	52.61	29.31	149.03
6.	509.00	25.46	32.24	23.63	91.42
7.	1466.00	43.20	52.66	41.99	181.30
8.	1100.00	37.42	56.44	30.64	169.33
9.	1030.00	36.21	47.06	32.32	144.91
10.	643.00	28.61	38.59	24.13	112.41
11.	1145.00	38.18	52.25	36.51	171.82
12.	584.00	27.27	37.67	21.96	94.10
13.	671.00	29.23	42.59	24.70	111.39
14.	471.00	24.49	35.06	21.59	93.45
15.	367.00	21.62	30.41	17.55	76.80
16.	1223.00	39.46	51.80	34.92	153.84
17.	645.00	28.66	39.27	25.84	117.68
18.	688.00	29.60	44.46	22.44	113.75
19.	605.00	27.75	34.28	24.65	114.17
20.	628.00	28.28	41.44	24.04	112.64
21.	519.00	25.71	31.48	25.00	95.44
22.	398.00	22.51	30.07	19.23	79.81
23.	869.00	33.26	50.04	29.26	136.73
24.	532.00	26.03	33.25	23.28	106.17
25.	907.00	33.98	47.86	36.75	160.73
26.	1137.00	38.05	49.76	35.91	159.85
27.	551.00	26.49	37.36	22.21	100.34
28.	700.00	29.85	36.70	27.09	117.54
29.	697.00	29.79	43.05	26.03	118.56
30.	560.00	26.70	31.02	28.00	105.94

Tab.10.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [px ²]	713.20	279.46	367.00	1466.00
ekv. průměr [px]	29.60	5.65	21.62	43.20
max rozměr [px]	39.92	8.62	26.81	56.44
min rozměr [px]	26.73	5.80	17.55	41.99
obvod [px]	117.92	30.08	72.78	181.30

Tab.11.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 D1 pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	474.32	24.57	28.81	23.89	86.93
2.	592.43	27.46	36.45	23.34	95.60
3.	637.78	28.50	40.11	25.29	108.73
4.	348.65	21.07	24.50	20.99	73.89
5.	469.60	24.45	34.98	18.16	85.85
6.	306.14	19.74	27.38	18.85	76.41
7.	316.53	20.08	27.66	15.68	70.97
8.	329.76	20.49	28.41	16.52	80.50
9.	757.78	31.06	40.07	29.02	108.28
10.	280.62	18.90	22.29	19.00	67.92
11.	275.90	18.74	23.41	16.52	61.85
12.	371.33	21.74	30.98	17.04	75.20
13.	334.48	20.64	27.38	19.10	76.18
14.	554.63	26.57	36.82	23.34	99.83
15.	308.02	19.80	25.50	17.43	73.13
16.	485.66	24.87	28.81	25.26	88.01
17.	220.15	16.74	19.05	16.66	56.09
18.	256.06	18.06	23.18	16.83	63.91
19.	347.71	21.04	26.48	19.14	81.27
20.	342.98	20.90	25.96	18.47	71.83
21.	220.15	16.74	19.24	16.52	56.09
22.	528.18	25.93	34.78	25.17	92.46
23.	351.49	21.15	30.15	16.30	76.50
24.	314.64	20.02	24.98	17.50	68.14
25.	319.36	20.16	27.93	16.17	70.75
26.	231.49	17.17	23.16	14.15	59.46
27.	235.27	17.31	23.64	13.35	57.85
28.	356.21	21.30	26.71	21.12	82.79
29.	305.19	19.71	26.63	18.17	76.28
30.	407.24	22.77	26.91	23.11	83.56

Tab.11.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	375.99	129.48	220.15	757.78
ekv. průměr [μm]	21.59	3.55	16.74	31.06
max rozměr [μm]	28.08	5.38	19.05	40.11
min rozměr [μm]	19.40	3.74	13.35	29.02
obvod [μm]	77.54	13.82	56.09	108.73

Tab.12.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 D1 pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	1137.06	38.05	50.46	34.57	149.61
2.	549.28	26.45	36.93	26.93	120.62
3.	314.55	20.01	24.00	18.08	67.07
4.	362.43	21.48	25.48	19.84	72.81
5.	555.85	26.60	33.05	26.16	105.88
6.	522.05	25.78	35.23	25.76	112.38
7.	401.87	22.62	32.51	18.72	83.29
8.	420.65	23.14	29.78	22.23	89.12
9.	428.16	23.35	30.49	21.51	82.31
10.	315.48	20.04	25.19	18.13	68.02
11.	421.58	23.17	33.00	19.38	89.66
12.	516.42	25.64	29.58	24.81	88.81
13.	887.30	33.61	49.76	22.29	122.10
14.	256.33	18.07	24.94	15.24	65.55
15.	357.74	21.34	29.13	16.47	77.65
16.	386.84	22.19	31.02	18.10	79.84
17.	423.46	23.22	29.67	21.32	81.46
18.	373.70	21.81	24.40	20.16	72.27
19.	304.22	19.68	22.74	18.45	66.31
20.	290.13	19.22	24.26	17.03	65.33
21.	927.67	34.37	41.77	35.23	127.34
22.	755.85	31.02	39.69	28.33	110.98
23.	260.09	18.20	22.37	18.79	68.91
24.	320.18	20.19	23.59	19.81	73.66
25.	428.16	23.35	28.39	20.87	79.62
26.	290.13	19.22	21.70	19.07	62.95
27.	464.78	24.33	32.65	22.45	88.49
28.	603.74	27.73	41.27	24.10	109.15
29.	334.26	20.63	26.40	16.91	76.26
30.	493.88	25.06	31.32	22.70	96.92

Tab.12.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	470.13	206.04	256.33	1137.06
ekv. průměr [μm]	21.99	4.82	18.07	38.05
max rozměr [μm]	31.03	7.43	21.70	50.46
min rozměr [μm]	19.78	4.75	15.24	35.23
obvod [μm]	88.48	21.62	62.95	149.61

Tab.13.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 D2 pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	918.76	34.20	47.25	28.19	145.28
2.	989.07	35.49	42.87	34.39	138.22
3.	1452.20	43.00	63.33	38.87	179.63
4.	1147.51	38.22	51.69	35.80	183.11
5.	1077.20	37.03	55.14	28.41	161.62
6.	503.44	25.32	29.16	25.35	84.53
7.	369.38	21.69	30.42	17.07	79.24
8.	1370.64	41.77	64.01	36.96	202.33
9.	293.44	19.33	26.38	16.60	71.86
10.	1931.27	49.59	62.10	46.19	253.49
11.	397.50	22.50	29.46	19.59	82.56
12.	696.57	29.78	39.62	25.98	120.30
13.	415.32	23.00	28.51	20.79	81.39
14.	1361.26	41.63	58.29	35.30	184.32
15.	466.88	24.38	32.15	24.48	94.69
16.	459.38	24.18	29.31	22.02	80.00
17.	840.94	32.72	55.92	25.11	168.52
18.	591.57	27.44	32.91	26.64	94.69
19.	395.63	22.44	25.17	22.27	75.22
20.	487.50	24.91	32.15	22.94	93.71
21.	896.26	33.78	45.88	27.48	133.47
22.	237.19	17.38	20.93	16.29	59.01
23.	309.38	19.85	25.77	19.82	81.17
24.	396.57	22.47	29.98	22.27	91.43
25.	388.13	22.23	27.55	23.16	96.30
26.	330.94	20.53	25.48	20.28	80.63
27.	811.88	32.15	47.16	31.92	145.91
28.	450.00	23.94	31.54	20.97	84.53
29.	375.94	21.88	27.55	20.69	80.32
30.	540.00	26.22	32.82	25.51	119.54

Tab.13.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	696.72	414.18	237.19	1931.27
ekv. průměr [μm]	26.64	8.19	17.38	49.59
max rozměr [μm]	38.35	13.02	20.93	64.01
min rozměr [μm]	24.04	7.10	16.29	46.19
obvod [μm]	118.23	47.18	59.01	253.49

Tab.14.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 D2 pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	757.16	31.05	43.81	28.84	129.82
2.	682.29	29.47	36.64	31.44	114.70
3.	278.90	18.84	22.34	18.36	63.83
4.	639.23	28.53	40.68	26.23	120.51
5.	250.83	17.87	23.30	17.76	68.04
6.	729.08	30.47	37.40	29.99	111.57
7.	379.05	21.97	29.68	18.95	78.06
8.	479.19	24.70	29.62	23.01	89.74
9.	360.33	21.42	25.76	21.49	75.15
10.	722.53	30.33	46.96	27.14	129.06
11.	1320.58	41.01	52.57	38.03	175.18
12.	495.10	25.11	31.70	25.60	106.82
13.	273.29	18.65	24.68	14.51	63.70
14.	260.19	18.20	23.80	15.48	65.00
15.	286.39	19.10	27.28	15.33	71.17
16.	475.45	24.60	28.47	24.11	97.52
17.	333.19	20.60	24.92	20.32	73.10
18.	203.09	16.08	18.11	14.51	51.40
19.	310.73	19.89	26.58	16.93	81.64
20.	325.70	20.36	23.96	21.07	76.23
21.	307.92	19.80	26.51	16.13	72.25
22.	518.50	25.69	30.58	24.05	95.78
23.	708.49	30.03	45.09	26.31	137.38
24.	376.24	21.89	31.94	19.98	84.99
25.	323.83	20.31	24.37	20.54	73.77
26.	529.73	25.97	34.83	22.23	113.49
27.	1351.47	41.48	48.41	39.28	156.39
28.	292.94	19.31	27.10	16.01	79.27
29.	423.04	23.21	29.09	21.94	96.45
30.	327.57	20.42	27.28	20.09	87.37

Tab.14.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	490.73	277.24	203.09	1351.47
ekv. průměr [μm]	24.21	6.21	16.08	41.48
max rozměr [μm]	31.45	8.58	18.11	52.57
min rozměr [μm]	22.52	6.28	14.51	39.28
obvod [μm]	94.65	29.04	51.40	175.18

Tab.15.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 D2 pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	586.00	27.32	39.22	23.57	107.27
2.	373.08	21.79	27.20	19.66	80.61
3.	302.42	19.62	24.43	20.56	80.92
4.	271.33	18.59	23.82	15.84	66.20
5.	841.32	32.73	43.88	29.79	134.24
6.	309.96	19.87	26.67	16.64	69.57
7.	831.89	32.55	39.76	33.22	145.51
8.	527.59	25.92	34.87	21.40	101.75
9.	892.19	33.70	43.96	32.03	127.64
10.	704.71	29.95	42.27	27.53	121.14
11.	285.46	19.06	27.10	17.33	75.09
12.	455.05	24.07	29.83	25.43	103.27
13.	416.42	23.03	30.74	21.35	93.72
14.	337.28	20.72	26.67	17.41	69.88
15.	513.46	25.57	31.43	24.85	95.69
16.	663.25	29.06	38.14	24.93	113.01
17.	227.05	17.00	21.38	15.36	59.69
18.	336.34	20.69	26.60	18.03	72.48
19.	403.23	22.66	28.58	23.30	84.74
20.	319.38	20.17	27.37	17.02	70.87
21.	265.68	18.39	22.67	16.50	65.44
22.	350.47	21.12	24.98	21.21	75.63
23.	429.61	23.39	28.01	22.81	88.42
24.	292.06	19.28	24.43	16.07	65.03
25.	280.75	18.91	24.43	17.93	70.33
26.	496.50	25.14	36.26	22.96	111.17
27.	457.87	24.14	29.52	21.85	80.29
28.	281.69	18.94	25.31	17.73	68.04
29.	377.79	21.93	28.37	21.56	81.82
30.	632.16	28.37	35.11	25.24	104.35

Tab.15.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	448.73	182.78	227.05	892.19
ekv. průměr [μm]	22.46	4.60	17.00	33.70
max rozměr [μm]	30.43	6.44	21.38	43.96
min rozměr [μm]	21.64	4.70	15.36	33.22
obvod [μm]	89.46	22.45	59.69	145.51

Tab.16.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 E1 pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	752.07	30.94	33.91	31.77	110.07
2.	508.59	25.45	32.86	23.75	97.96
3.	428.68	23.36	29.80	21.99	89.84
4.	528.33	25.94	34.13	23.56	93.52
5.	1749.50	47.20	72.51	42.79	229.14
6.	793.43	31.78	43.56	29.09	126.52
7.	1192.97	38.97	54.12	35.45	156.96
8.	1024.69	36.12	52.28	29.49	162.57
9.	438.08	23.62	31.34	22.60	87.24
10.	680.62	29.44	40.23	24.67	109.84
11.	930.68	34.42	43.24	35.51	150.64
12.	814.11	32.20	47.76	25.14	129.44
13.	1060.42	36.74	60.40	28.45	159.02
14.	659.94	28.99	41.05	23.97	117.24
15.	453.12	24.02	32.63	21.33	87.56
16.	510.47	25.49	31.77	22.70	85.81
17.	370.39	21.72	27.98	19.78	73.71
18.	748.31	30.87	38.89	32.03	125.67
19.	624.22	28.19	36.64	23.25	97.96
20.	953.25	34.84	45.88	34.41	147.06
21.	715.40	30.18	44.54	24.82	137.33
22.	390.14	22.29	25.50	21.34	73.39
23.	454.06	24.04	30.28	22.03	89.08
24.	921.28	34.25	52.14	29.25	140.37
25.	597.89	27.59	36.57	25.94	106.71
26.	853.60	32.97	46.16	31.14	130.64
27.	641.14	28.57	41.89	21.51	114.19
28.	515.17	25.61	32.98	24.05	115.04
29.	798.13	31.88	45.07	30.03	139.61
30.	2489.35	56.30	92.21	46.54	309.13

Tab.16.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	786.60	424.63	370.39	2489.35
ekv. průměr [μm]	27.80	7.28	21.72	56.30
max rozměr [μm]	42.61	13.72	25.50	92.21
min rozměr [μm]	25.61	6.36	19.78	46.54
obvod [μm]	126.44	46.83	73.39	309.13

Tab.17.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 E1 pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	244.42	17.64	20.60	16.74	59.54
2.	1422.35	42.56	54.94	39.24	188.12
3.	905.30	33.95	41.87	34.81	134.99
4.	222.80	16.84	20.86	16.44	59.63
5.	191.78	15.63	19.26	13.57	52.81
6.	325.27	20.35	23.85	20.20	74.56
7.	215.28	16.56	22.84	15.76	64.29
8.	396.72	22.47	27.93	22.82	89.94
9.	369.45	21.69	29.75	18.37	91.46
10.	425.86	23.29	30.28	21.54	85.28
11.	241.60	17.54	21.85	15.22	60.08
12.	382.61	22.07	27.06	23.42	92.22
13.	203.06	16.08	19.59	15.31	55.19
14.	577.21	27.11	34.89	25.82	102.81
15.	561.23	26.73	34.40	25.95	113.87
16.	313.05	19.96	23.79	18.42	65.59
17.	714.46	30.16	37.82	30.56	139.74
18.	724.81	30.38	41.87	24.28	111.28
19.	378.85	21.96	28.75	21.86	81.06
20.	828.22	32.47	40.95	31.98	130.64
21.	409.88	22.84	30.51	19.69	80.21
22.	211.52	16.41	21.21	12.60	56.27
23.	284.85	19.04	23.61	16.48	63.53
24.	1738.22	47.04	55.21	48.16	194.40
25.	632.68	28.38	35.27	27.19	102.18
26.	512.35	25.54	35.73	22.24	101.41
27.	322.45	20.26	25.21	19.38	73.93
28.	518.93	25.70	37.42	23.59	107.91
29.	245.36	17.67	23.35	16.89	72.54
30.	376.97	21.91	28.93	20.26	82.58

Tab.17.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	499.05	347.82	191.78	1738.22
ekv. průměr [μm]	25.33	7.47	15.63	47.04
max rozměr [μm]	37.18	9.41	19.26	55.21
min rozměr [μm]	21.07	7.80	12.60	48.16
obvod [μm]	109,2	35.45	52.81	194.40

Tab.18.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 E1 pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	300.60	19.56	24.16	18.23	71.08
2.	753.38	30.97	41.26	29.12	121.56
3.	484.92	24.85	34.23	22.83	88.34
4.	364.87	21.55	31.16	14.58	76.16
5.	715.57	30.18	42.31	25.22	112.21
6.	267.51	18.46	22.82	16.53	60.56
7.	443.33	23.76	29.01	22.30	81.51
8.	590.79	27.43	34.16	25.48	93.78
9.	1295.02	40.61	54.16	37.39	164.95
10.	403.63	22.67	27.42	20.61	79.44
11.	679.65	29.42	36.84	30.36	126.87
12.	311.94	19.93	23.01	18.82	68.60
13.	363.93	21.53	26.64	20.73	80.97
14.	578.51	27.14	35.34	25.94	101.92
15.	337.46	20.73	24.49	19.45	69.24
16.	407.41	22.78	29.43	20.07	77.82
17.	305.32	19.72	25.76	20.42	70.54
18.	353.53	21.22	34.23	17.42	89.55
19.	314.77	20.02	27.99	18.44	81.51
20.	354.48	21.24	29.83	19.74	80.97
21.	590.79	27.43	34.03	26.49	108.53
22.	288.31	19.16	22.38	17.60	62.94
23.	252.39	17.93	21.85	16.63	67.62
24.	510.45	25.49	37.10	20.38	96.03
25.	380.00	22.00	26.64	22.29	85.64
26.	416.86	23.04	33.42	18.07	83.13
27.	456.57	24.11	37.27	19.49	102.46
28.	256.17	18.06	24.16	14.64	66.85
29.	403.63	22.67	29.43	22.02	89.96
30.	566.22	26.85	35.43	23.33	105.60

Tab.18.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	458.27	206.27	252.39	1295.02
ekv. průměr [μm]	22.68	4.76	17.93	40.61
max rozměr [μm]	31.20	7.04	21.85	54.16
min rozměr [μm]	20.49	4.84	14.58	37.39
obvod [μm]	88.88	21.95	60.56	164.95

Tab.19.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 4 E2 pro dotlak 10 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	608.35	27.83	38.39	22.90	106.76
2.	235.64	17.32	18.99	17.03	55.91
3.	647.78	28.72	34.71	26.85	104.26
4.	677.82	29.38	45.16	20.55	113.35
5.	786.72	31.65	37.86	32.47	121.46
6.	286.34	19.09	25.48	19.27	73.43
7.	966.03	35.07	45.43	36.48	153.14
8.	1507.72	43.81	60.07	45.29	207.26
9.	1221.39	39.43	53.41	35.47	163.12
10.	1769.65	47.47	59.55	43.34	183.96
11.	1100.28	37.43	51.97	31.80	139.65
12.	657.16	28.93	35.33	27.21	102.96
13.	754.80	31.00	40.91	28.41	116.17
14.	789.54	31.71	51.96	23.37	137.05
15.	505.08	25.36	31.88	25.68	109.01
16.	1043.01	36.44	44.00	36.69	172.09
17.	1369.72	41.76	65.95	30.85	179.75
18.	373.64	21.81	28.17	20.30	75.18
19.	649.65	28.76	39.75	25.55	112.28
20.	401.81	22.62	29.66	19.81	88.58
21.	512.59	25.55	38.70	20.48	100.36
22.	306.99	19.77	22.22	19.31	65.86
23.	816.76	32.25	40.50	33.72	129.79
24.	956.64	34.90	49.85	29.83	142.25
25.	813.94	32.19	42.59	26.98	136.16
26.	511.65	25.52	35.23	19.67	98.88
27.	569.86	26.94	34.81	23.44	100.81
28.	567.04	26.87	33.54	26.00	110.22
29.	724.76	30.38	38.87	29.89	128.81
30.	721.94	30.32	37.03	33.17	121.46

Tab.19.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	761.81	353.97	235.64	1769.65
ekv. průměr [μm]	25.34	7.02	17.32	47.47
max rozměr [μm]	40.40	10.86	18.99	65.95
min rozměr [μm]	21.73	7.10	17.03	45.29
obvod [μm]	121.67	35.08	55.91	207.26

Tab.20.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 5 E2 pro dotlak 35 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	834.94	32.60	39.99	33.21	156.67
2.	862.12	33.13	43.84	30.23	126.99
3.	720.62	30.29	42.15	28.79	125.56
4.	463.86	24.30	32.48	21.11	86.88
5.	258.63	18.15	23.25	14.76	65.80
6.	348.59	21.07	25.48	21.20	87.96
7.	322.36	20.26	26.60	15.49	67.64
8.	560.38	26.71	36.20	25.49	111.63
9.	1294.11	40.59	51.16	37.85	166.20
10.	387.95	22.23	27.03	22.47	88.40
11.	576.31	27.09	36.20	24.39	116.92
12.	279.25	18.86	21.82	18.92	64.95
13.	518.21	25.69	32.14	22.96	88.72
14.	401.07	22.60	32.18	21.03	85.49
15.	267.07	18.44	22.91	16.85	63.52
16.	337.35	20.73	26.69	19.95	75.65
17.	230.52	17.13	22.22	14.66	56.85
18.	327.98	20.44	26.08	17.87	73.05
19.	367.34	21.63	30.79	21.30	89.70
20.	367.34	21.63	27.55	19.58	76.28
21.	447.93	23.88	29.16	22.83	95.75
22.	1043.91	36.46	53.10	30.73	148.25
23.	446.99	23.86	28.38	21.79	79.86
24.	490.09	24.98	35.67	22.72	100.71
25.	372.02	21.76	32.92	16.46	81.15
26.	265.19	18.38	23.57	16.93	67.54
27.	426.37	23.30	31.73	21.30	99.19
28.	625.03	28.21	38.55	25.96	120.24
29.	260.51	18.21	22.46	16.46	64.19
30.	324.23	20.32	27.03	18.16	78.02

Tab.20.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	424,71	245.43	230.52	1294.11
ekv. průměr [μm]	23,22	5.63	17.13	40.59
max rozměr [μm]	31.95	8.07	21.82	53.10
min rozměr [μm]	20,29	5.54	14.66	37.85
obvod [μm]	89,93	28.25	56.85	166.20

Tab.21.1 Naměřené hodnoty struktury vzorku 6 E2 pro dotlak 120 MPa

položka	plocha [μm^2]	ekv. průměr [μm]	max rozměr [μm]	min rozměr [μm]	obvod [μm]
1.	401.81	22.62	30.63	17.51	79.71
2.	591.45	27.44	40.31	21.35	104.48
3.	350.17	21.12	27.70	17.94	78.41
4.	1177.26	38.72	50.09	34.95	152.60
5.	394.30	22.41	29.13	20.69	79.48
6.	493.81	25.07	29.08	26.22	96.06
7.	427.16	23.32	31.05	20.35	81.45
8.	247.84	17.76	20.59	17.60	60.89
9.	585.81	27.31	32.41	25.63	93.01
10.	412.14	22.91	30.11	17.84	85.44
11.	1067.42	36.87	46.05	33.92	145.79
12.	440.30	23.68	31.76	20.15	86.87
13.	640.27	28.55	40.41	22.64	111.96
14.	489.12	24.96	31.93	22.67	84.59
15.	526.67	25.90	36.08	21.94	102.11
16.	738.84	30.67	40.03	28.54	126.97
17.	265.68	18.39	24.90	14.74	65.23
18.	492.87	25.05	35.70	19.91	104.93
19.	219.68	16.72	19.07	16.31	54.30
20.	280.70	18.91	20.59	19.20	61.65
21.	547.32	26.40	36.93	24.97	109.77
22.	408.38	22.80	31.56	17.98	81.45
23.	290.09	19.22	27.77	14.98	71.60
24.	453.44	24.03	28.86	24.34	87.50
25.	447.81	23.88	37.90	18.86	98.97
26.	679.70	29.42	41.27	24.69	115.95
27.	240.33	17.49	19.60	16.47	55.60
28.	551.08	26.49	33.87	22.29	88.04
29.	483.49	24.81	33.18	21.21	88.26
30.	409.32	22.83	29.27	21.32	76.12

Tab.21.2 Statistické výsledky naměřených hodnot

Příznak	Stř.Hodnota	Směr.Odchylka	Minimum	Maximum
plocha [μm^2]	491.81	211.93	219.68	1177.26
ekv. průměr [μm]	21.52	4.98	16.72	38.72
max rozměr [μm]	32.26	7.34	19.07	50.09
min rozměr [μm]	19.57	4.78	14.74	34.95
obvod [μm]	90.97	23.41	54.30	152.60