

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce
Fakulta strojní
obor 23-07-8
strojírenská technologie
zaměření
strojírenská metalurgie
Katedra materiálu a strojírenské technologie

ODLÉVÁNÍ ROZVÁDĚCÍCH VÁLCŮ ZE SLITINY HLINÍKU

KMM - 308

Jiří Krejčí

Vedoucí diplomové práce : Ing. Iva Nová, CSc
VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran : 61
Počet tabulek : 7
Počet obrázků : 17
Počet příloh : -
Počet výkresů : -

2. června 1989

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMELECKÉHO DÍLA, UMELECKÉHO VÝKONU)

pro **Jiří K R E J Č Í**

obor **strojírenská technologie**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Odlévání rozváděcích válců ze slitiny hliníku.**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení s výrobou odlitků ze slitin hliníku se zaměřením na technologii odstředivého lití.
2. Seznámení s konstrukcí a požadavky na rozváděcí válce v k.p. ELITEX, závod Chrastava.
3. Návrh kokily pro výrobu vybraného typu rozváděcího válce a návrh vhodného materiálu pro výrobu jádra.
4. Ověřovací odlévání rozváděcích válců z vybrané slitiny hliníku zvolenou technologií.
5. Vyhodnocení navržené technologie a doporučení pro její realizaci.

V. 194/89 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

*Ally hliníku -
hliníkové -
- odlévání -
- válce rozváděcí (ELITEX)*

Rozsah grafických prací:

tabulky, grafy
40 - 50 stran

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:

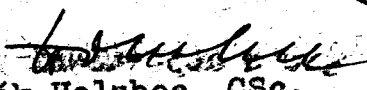
- /1/ FERČÁK, D.: Návrh zařízení pro odlévání rozváděcích válců./Diplomová práce / VŠST - FS Liberec, 1986.
- /2/ ŠIROKICH, J.: Zařízení sléváren. 1.vydání, Praha, 1968.
- /3/ JUDIN, S.B. a kol.: Centroběžnoje lit'jo. Moskva, 1962
- /4/ RADEJ, J.: Návrh zařízení pro odlévání rozváděcích válců. /Diplomová práce/, VŠST - FS Liberec, 1987.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nová, CSc

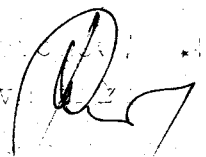
Datum zadání diplomové práce: 12.9.1988

Termín odevzdání diplomové práce: 2.6.1989




Doc. Ing. Zdeněk Holubec, CSc.

Vedoucí katedry


Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.

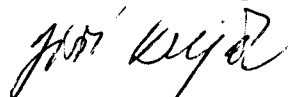
Děkan

v Liberci dne 11.9. 1988

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

V Liberci dne 2. 6. 1989

Jiří K r e j č í



O B S A H

1.0.	Úvod.....	4
2.0.	Teoretická část.....	5
2.1.	Charakteristika odstředivého lití.....	5
2.1.1.	Výhody odstředivého lití.....	5
2.1.2.	Metody odstředivého lití.....	6
2.2.	Teoretický rozbor odstředivého lití.....	8
2.2.1.	Rozložení tlaku ve formě při odstředivém lití....	10
2.2.2.	Stanovení rychlosti otáčení.....	12
2.2.3.	Účinek rotace na vměstky v roztaveném kovu.....	19
2.3.	Odstředivé stroje a jejich rozdělení.....	20
2.3.1.	Horizontální lící stroj.....	21
2.3.2.	Vertikální lící stroj.....	21
2.3.3.	Volba lícího stroje.....	21
2.4.	Slévárenské slitiny hliníku.....	22
2.5.	Tavení a odlévání hliníkových slitin.....	25
2.6.	Tuhnutí odlitků hliníkových slitin v kovových formách /kokilách/.....	25
2.6.1.	Segregace.....	27
2.6.2.	Odměšování.....	27
2.7.	Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin...	31
2.7.1.	Slévatelnost.....	31
2.7.2.	Sklon k trhlinám a prasklinám.....	31
2.8.	Slévárenské vlastnosti hliníku a jeho slitin....	32
2.8.1.	Tavitelnost.....	32
2.8.2.	Tekutost.....	34
2.8.3.	Zabíhavost.....	34
2.8.4.	Smršťování a stahování hliníkových odlitků.....	35

2.9.	Vady odlitků.....	37
3.0.	Experimentální část.....	39
3.1.	Popis zařízení.....	39
3.2.	Výroba jader.....	42
3.3.	Technologický postup odstředivého lití.....	46
3.3.1.	Čištění odlitků.....	47
3.4.	Vyhodnocení kvality vyrobených odlitků.....	47
3.5.	Struktura odlitků.....	50
3.6.	Měření tvrdosti.....	53
4.0.	Diskuze výsledků.....	55
5.0.	Návrh řízení otáček motoru.....	56
6.0.	Závěr.....	58
7.0.	Použitá literatura.....	60

1.0. ÚVOD

V dnešní době vědecko-technické revoluce jsme svědky zvyšování nároků na výrobu, na využívání nových netradičních technologií, materiálů a energií. Jsou hledány stále nové možnosti jak zvýšit kvalitu i kvantitu výroby. Tento stav není vyvolán jen konkurencí, ale i ztenčujícími se zdroji prvotních surovin a nezřídka i světovou politickou situací.

V našem strojírenském průmyslu zaujímá velice významné místo slévárenská výroba. Jednou z cest jak zlepšit jakost odlitků, snížit zmetkovitost a účelněji využívat energie a surovin, je zavádění nových progresivních technologií. V opačném případě se naše národní hospodářství bude i nadále potýkat s problémy výroby a spotřeby, které mají negativní sociálně-ekonomický dopad.

Mezi takovéto moderní technologie patří i odstředivé lití. Zajišťuje výrobu kvalitních odlitků s minimálními požadavky na dokončovací úpravy. Šetří používaný materiál, protože při odlévání není potřeba využívat přídavky, které jsou běžné ve slévárenské technologii jako např. nálitky, přídavky na opracování, výfuky atd. Dále lze touto technologií zvýšit i sortiment odlévaných materiálů i tvarů.

Cílem mé diplomové práce je navrhnout a ověřit zařízení pro výrobu rozváděcích válců v n.p. Elitex Chrastava metodou odstředivého lití a stanovení potřebných technologických parametrů. Dále je třeba navrhnout kokilu pro výrobu vybraného typu rozváděcího válce a navrhnout vhodný materiál pro výrobu jádra i vhodnou slitinu hliníku, kterou by bylo možno povrchově upravovat eloxováním, pro zajištění požadovaných mechanických vlastností. Provedení vyhodnocení navržené technologie a doporučení pro její realizaci.

2.0. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. CHARAKTERISTIKA ODSTŘEDIVÉHO LITÍ

Odstředivé lití je zvláštní způsob technologie odlévání, kdy roztavený kov vtéká do rotující formy - kokily, která se otáčí kolem své osy. Kov je nucen konat rotační pohyb a odstředivá síla na něj působící způsobuje, že kov se pohybuje proti stěnám formy, a jehož tlakem se dosáhne těsného kontaktu mezi ním a formou.

Ostatní částice jako jsou plyny, struska, vměstky a jiný nekovový materiál o menší hustotě než má daný kov, se vytlačují na stranu vnitřních ploch odlitku. Dále má odstředivá síla význam při tuhnutí a krystalizaci.

Roztavený kov vyplňuje mezidendritické dutiny a tím zajišťuje větší hutnost odlitku. Proto je nutné, aby rotace pokračovala až do úplného ztuhnutí odlitku. Tato technologie odstředivého lití nám umožňuje výrobu jakostnějších a přesnějších odlitků než lití gravitační.

2.1.1. VÝHODY ODSTŘEDIVÉHO LITÍ

1. Méně pracná nebo úplně zbytečná povrchová úprava, náklady na obrábění se sníží o 10-30 %.
2. Menší spotřeba tekutého kovu, protože přídavky na opracování mohou být menší a lze se obejít v určitých případech i bez vtoků a nálitků.
3. Minimalizovaná spotřeba formovacích směsí.
4. Výrazně menší počet zmetků.
5. Celkové náklady na výrobu některých odlitků bývají 2-8x menší,

než u odlitků odlévaných stacionárně.

6. Výrazně se zvyšuje produktivita práce.
7. V určitých případech není vůbec zapotřebí formířské práce.
8. Touto technologií lze odlévat i několikavrstvé odlitky.

Hlavní nevýhody jsou :

1. Hmotnost odlitku je omezena, běžně se pohybuje kolem 5 kg, maximálně však 25 kg.
2. Větší náklady na strojové vybavení, formu a pomocná zařízení.
3. Omezení tvaru odlitku.

2.1.2. METODY ODSTŘEDIVÉHO LITÍ

Rozdělení odstředivého lití je různé podle definic různých autorů:

- A. - odstředivé lití s horizontální osou rotace
 - odstředivé lití s vertikální osou rotace
 - odstředivé lití se šikmou osou rotace
- B. - pravé
 - poloodstředivé
 - odstřeďování
- C. - pravé
 - poloodstředivé
 - lití pod odstředivým tlakem

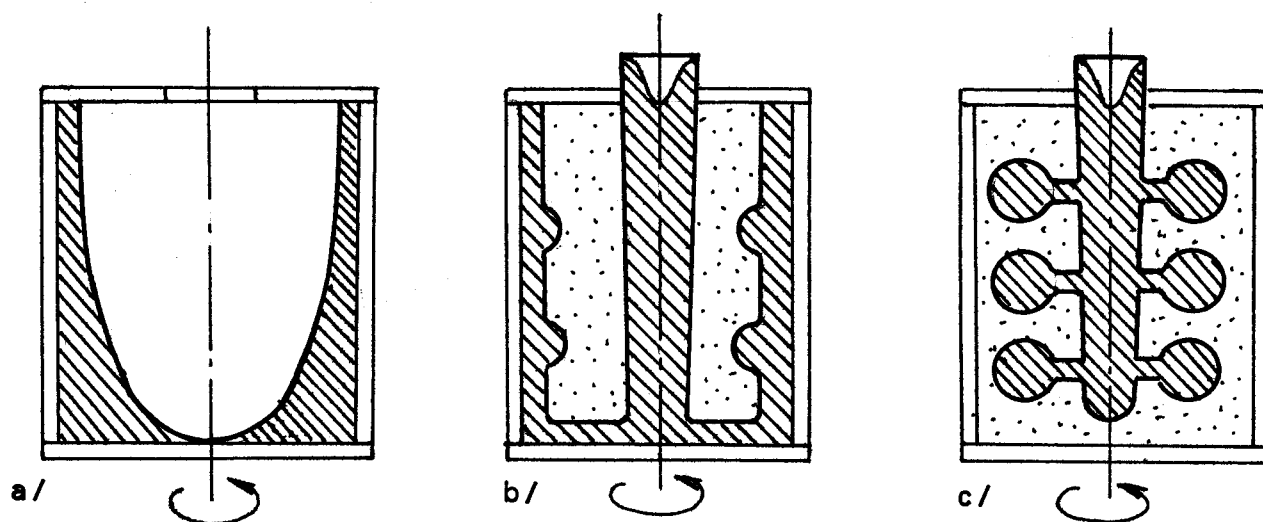
Pravé odstředivé lití : tímto způsobem se vyrábějí trubky, kroužky, pouzdra atd. Roztavený kov se vlévá do formy, která má velké otáčky, přičemž osa rotace je totožná s osou odlitku a vnitřní tvar je tvořen volným povrchem kovu vytvořeným rotací. Formy se používají většinou kovové - kokily, protože jsou značně namáhány jak mechanicky tak tepelně. Schéma pravého odstředivého lití

je na obr. 1a.

Poloodstředivé lití : tímto způsobem lze vyrábět odlitky s tvarovaným vnitřním povrchem, kde osa rotace formy a dolitku jsou totožné, avšak vnitřní povrch a dutiny jsou docíleny pomocí jader ať už pískových nebo kovových. Otáčky formy jsou však menší než v předešlém případě. Schéma poloodstředivého lití je na obr. 1b.

Odstřeďování : touto technologií se vyrábějí odlitky v netrvalých formách a do rotace se uvádějí až po naplnění formy roztaženým kovem.

Lití pod odstředivým tlakem : tímto způsobem se vyrábějí nesouměrné odlitky, které bývají rozloženy kolem centrálního vtoku, jak je naznačeno na obr. 1c.



Obr. 1. Způsoby odstředivého lití :

a/ pravé

b/ poloodstředivé

c/ pod odstředivým tlakem

2.2. TEORETICKÝ ROZBOR Odstředivého lití

VETIŠKA /2/ rozlišuje podle způsobu pohybu tekutého kovu v rotující formě dva postupy řešení teorie odstředivého lití :

1. Řešení hydrodynamické, které uvažuje relativní pohyb tekutého kovu vzhledem k formě.
2. Řešení hydrostatické, které uvažuje pohyb tekutého kovu za souhlasný s pohybem formy.

Hydrodynamické řešení silových účinků odstředivého lití

Předpokládá kromě gravitace a odstředivých sil i tření tekutého kovu o stěny rotující formy. Hodnoty otáček jsou menší než hodnoty vypočítané podle hydrostatických vztahů, protože se v podstatě určují minimální otáčky, kdy neodpadávají kapky tekutého kovu.

Tyto výpočty jsou velmi složité a pro jejich praktické využití je třeba znát velké množství různých hodnot. Budu se proto věnovat pouze hydrostatickému řešení.

Hydrostatické řešení silových účinků při odstředivém lití /3/

Na jednotku hmoty taveniny působí odstředivá síla

$$C = m \cdot a = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (1)$$

kde :

a - úhlové zrychlení $/\text{ms}^{-2}/$

r - poloměr otáčení hmotného bodu $/\text{m}/$

ω - úhlová rychlost $/\text{s}^{-1}/$

m - hmotnost částice $/\text{kg}/$

dále na taveninu působí tíhová síla

$$G = m \cdot g \quad (2)$$

tyto dávají výslednici

$$R = \sqrt{C^2 + G^2} \quad (3)$$

Tato výslednice svírá s vodorovnou rovinou úhel ω , který lze vyjádřit

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G}{C} = \frac{r}{2y} \quad (4)$$

$$\omega^2 = \frac{g}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

Řezem je paraboloid $y = \frac{\omega^2}{2g} \cdot r^2$ (6)

s vrcholem v počátku a parametrem

$$p = \frac{\omega^2}{2g} \quad (7)$$

Z tohoto výrazu lze odvodit vztah pro praxi k stanovení počtu otáček, potřebných k odlití válce výšky H a vnitřních poloměrů r_1 /horní/, r_2 /dolní/.

$$y_1 = \frac{\omega^2 \cdot r_1^2}{2g} \quad ; \quad y_2 = \frac{\omega^2 \cdot r_2^2}{2g} \quad (8)$$

$$H = y_1 - y_2 = \frac{\omega^2}{2g} \cdot (r_1^2 - r_2^2) \quad (9)$$

$$n = 423 \sqrt{\frac{H}{r_1^2 - r_2^2}} \quad (10)$$

Výraz /10/ lze psát ve zjednodušeném tvaru :

$$n = k \sqrt{H} \quad (11)$$

Je nutno kontrolovat tlak taveniny na kokilu a obvodovou rychlost vnitřního povrchu kokily :

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (12)$$

pro slitiny hliníku platí :

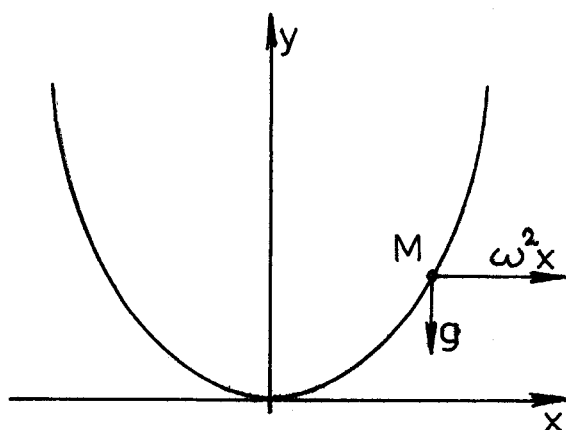
$$v < 36 \text{ms}^{-1}$$

Naznačení sil působících na hmotný bod je na obr.2.

2.2.1. ROZLOŽENÍ TLAKU VE FORMĚ PŘI ODSTŘEDIVÉM LITÍ /3/

K určení absolutního tlaku v libovolném místě otáčející se kokily s kovem můžeme použít vztahu

Tlak při rotaci kolem vertikální osy



Z obr. 4 je patrné, že hodnoty zrychlení působících na hmotný bod M na povrchu paraboloidu jsou:

$$X = \omega^2 \cdot x \quad (13)$$

$$Y = -g \quad (14)$$

obr. 4

Dosazením do /13/ dostaneme :

$$dp = \rho \cdot (\omega^2 \cdot x \cdot dx - g \cdot dy) \quad (15)$$

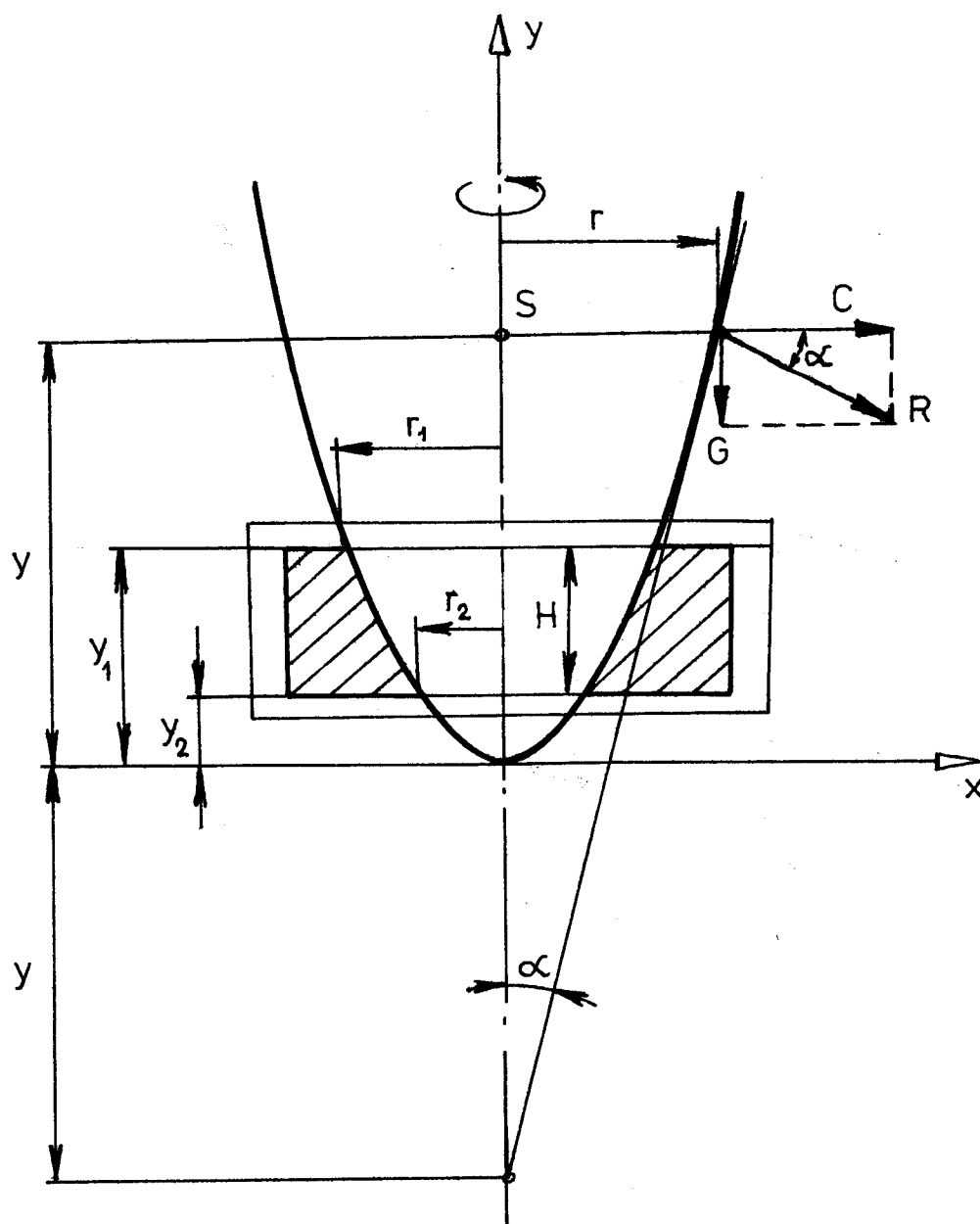
$$p = \rho \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} - g y \right) + \rho \cdot g \cdot y_0 \quad (16)$$

Jestliže dosadíme za ω a za $y_0 - y_1 = h$, pak dostaneme celkový vztah pro tlak v bodě M.

$$p = \frac{\rho}{10000} \cdot (5,589 \cdot r^2 \cdot n^2 + h) \quad (17)$$

Jestliže bod M, ve kterém určujeme tlak leží nad křivkou paraboloidu potom tlak bude roven :

$$p = \rho \cdot \frac{\omega^2}{2g} \cdot (r_a^2 - r_b^2) \quad (18)$$



Obr. 2 Působení sil na hmotný bod taveniny při rotaci kolem svislé osy.

C - odstředivá síla v N

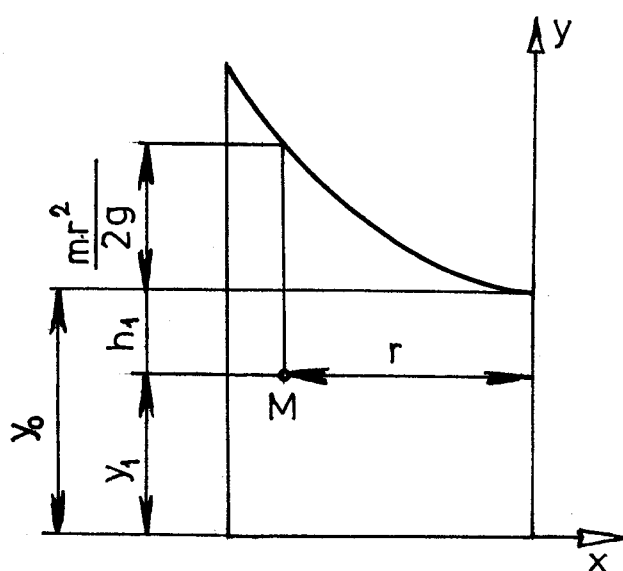
G - zemská tíže v N

R - výslednice v N

r_1 - poloměr horní volného povrchu v m

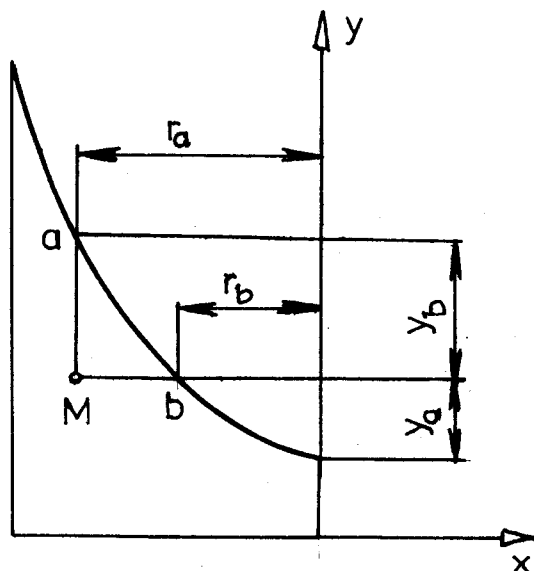
r_2 - poloměr dolní volného povrchu v m

H - výška odlitku v m



Obr. 5a

Schema určení tlaku v místě M při vertikální ose otáčení. Bod M leží níže, než je vrchol paraboloidu



Obr. 5b

Schema určení tlaku v místě M při vertikální ose otáčení. Bod M leží výše, než je vrchol paraboloidu

2.2.2. STANOVENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ /4/

Rychlost otáčení formy je jednou z prvních otázek, které je nutno vyřešit při zavádění odstředivého lití.

Výsledná struktura, struskové vměstky, pórovitost způsobené plynatostí nebo smršťováním při tuhnutí, hospodářský výtěžek a jiné vlastnosti odstředivého odlitku závisí na velikosti odstředivé síly, která se při změně úhlové rychlosti značně mění.

Znamé metody výpočtu rychlosti otáčení formy jsou založeny na těchto čtyřech základních výpočtech :

1. Na výpočtu podle požadované obvodové rychlosti
2. Na výpočtu podle součinitele gravitace
3. Na výpočtu tlaku kovu na formu

4. Podle empirických vzorců

1. Podle požadované obvodové rychlosti formy lze stanovit otáčky ze vztahů :

$$v = \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} \quad (19)$$

$$n = \frac{30 \cdot v}{\pi \cdot r} \quad (20)$$

kde :

r - poloměr částice /m/

v - požadovaná obvodová rychlost /ms⁻¹/ pro hliník

a hliníkové slitiny $v < 36$

odlitky ze šedé litiny $v > 30$

Takto stanovené otáčky se však v praxi neosvědčily.

2. Výpočet podle součinitele gravitace s rotací okolo vertikální osy.

Otáčí-li se odlitek kolem svislé osy, vzniká v jeho vnitřní části zužující se dutina, která má v osovém řezu tvar paraboly. Sklon stěny dutiny je výsledkem kombinace odstředivé síly a zemské tíže, které jsou na sebe kolmé. Tzn., že odlitek bude mít jinou tloušťku stěny v horní části a jinou v dolní části. Zkouškami při různých rychlostech se zjistilo, že nejlepší je rychlost, která má sklon vnitřní stěny 1 : 100.

Výška odlitku má mít poměr k poloměru 1 : 1,5.

K výpočtu otáček můžeme použít vzorce :

$$n = \sqrt{\frac{Q}{R}} \cdot 300 \quad (21)$$

$$Q = \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \cdot \frac{R}{g} = \frac{v^2}{R \cdot g} = \frac{C}{G} \quad (22)$$

kde :

C - odstředivá síla /N/

n - otáčky vřetena /min⁻¹/

g - zemské zrychlení /ms⁻²/

R - poloměr otáčení uvažované částice /m/

v - obvodová rychlost /ms⁻¹/

Q - gravitační součinitel

Výpočet můžeme urychlit použitím nomogramu - obr. č.6

3. Výpočet podle tlaku kovu na formu

Podle vztahu(17) je pro výpočet tlaku v libovolném místě formy určen vztah :

$$p = \frac{Q}{10\,000} \cdot (5,589 r^2 n^2 + h) \quad (23)$$

kde :

Q - hustota /kgm⁻³/

r - poloměr formy /m/

n - otáčky formy /min⁻¹/

h - rozdíl výšek /m/

Úpravou tohoto vztahu dostaneme požadovanou rychlost otáčení formy :

$$n = \sqrt{\left(\frac{p \cdot 10\,000}{Q} - h \right) / 5,589 r^2} \quad (24)$$

kde :

P_M - tlak v místě M /Pa/

Toto stanovení otáček záleží na přetlaku. Při malém přetlaku hodnoty otáček odpovídají praxi.

4. Výpočet podle empirických vzorců

Pro praktické použití odvodili dva na sobě nezávislé vztahy tito autoři. Prvním z nich byl Cammen. Jeho vztah :

$$n = \frac{C}{\sqrt{r}} \quad (25)$$

kde :

M - otáčky formy /min⁻¹/

C - koeficient závislý od vlastností litého kovu

pro ocel - 1350

šedá litina a bronzy - 1675

hliník - 2250

r - poloměr vnitřního povrchu odlitku v palcích

Druhým empirickým vzorcem je vzorec Konstantinova :

$$n = \frac{5520}{\sqrt{\varrho \cdot r}} \quad (26)$$

kde :

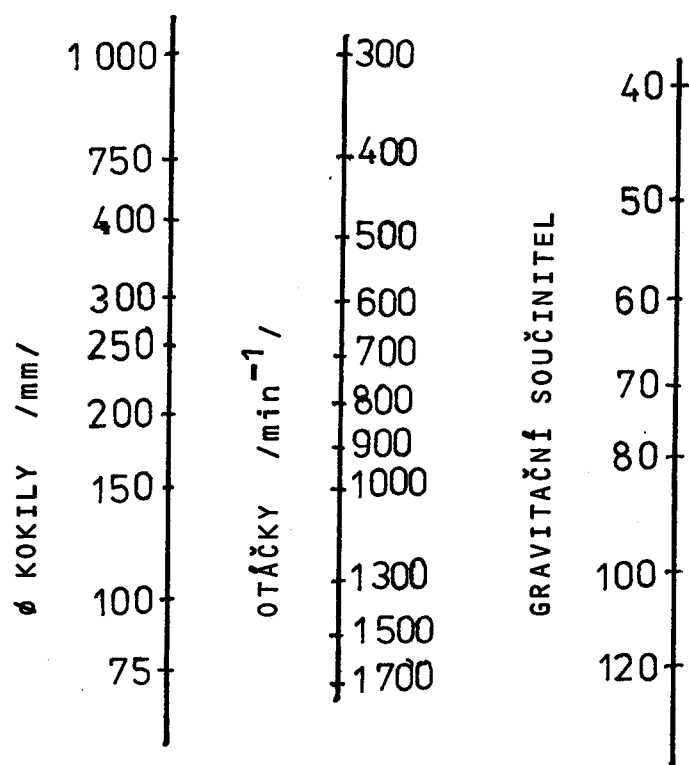
ϱ - hustota taveniny /gcm⁻³/

r - poloměr vnitřního povrchu odlitku /cm/

pro Al slitiny platí vztah :

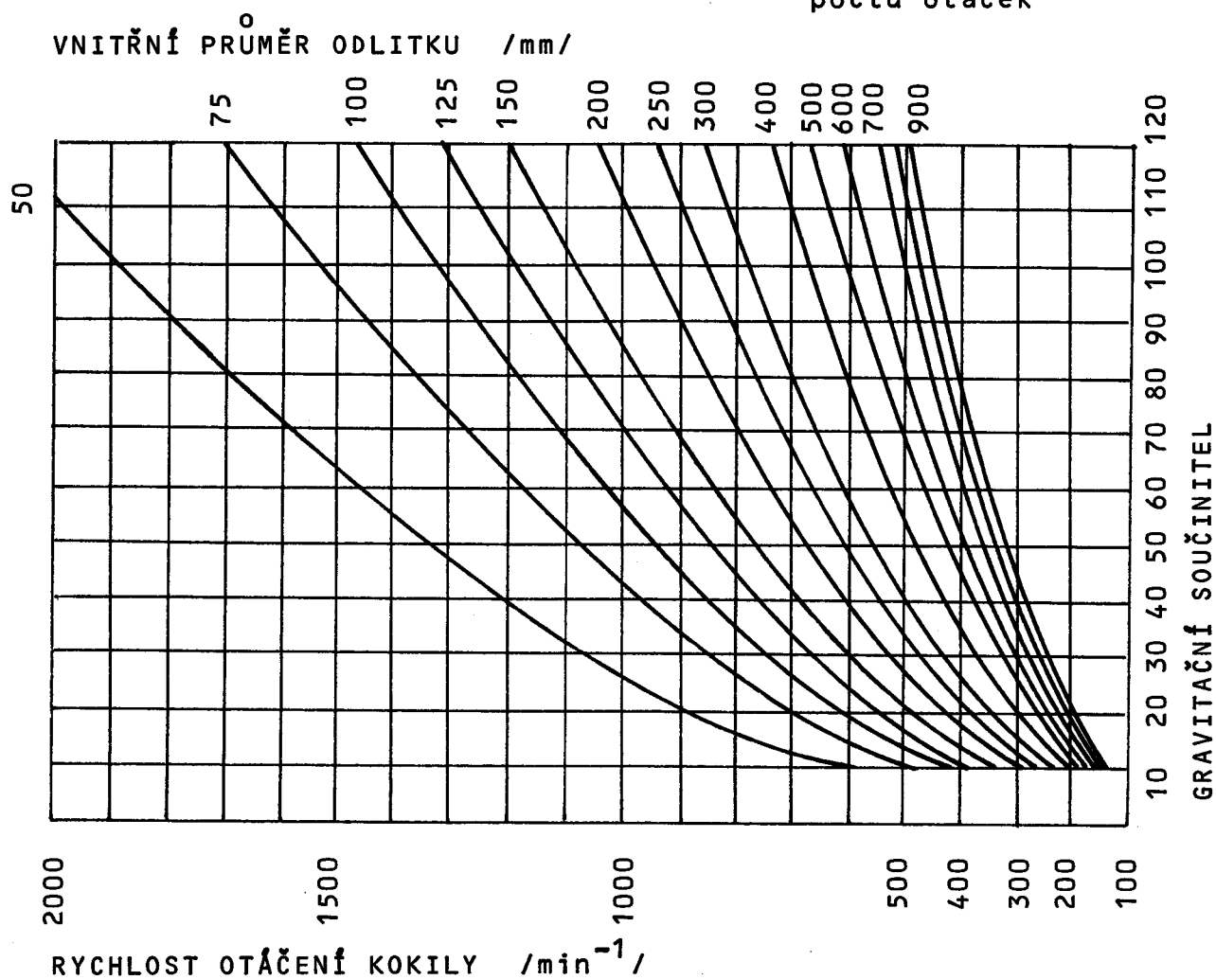
Oba dva výrazy jsou odvozeny ze základu gravitačního koeficientu. Pro některé případy byla vypracována tabulka k určení rychlosti otáčení formy při různých způsobech otáčení, poměru poloměrů, různých forem, gravitačního koeficientu a materiálu odlitku. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.1.

S použitím grafu obr.7 lze snadno určit rychlost otáčení formy při zadaném gravitačním koeficientu a vnitřního průměru odlitku. V případě, kdy kovovou formu před litím ohříváme, lze snížit otáčky formy až o polovinu. To plyne z toho, že je zapotřebí k správnému vyplnění formy menšího tlaku, menší odstředivé síly a tudíž i menšího gravitačního koeficientu.



Obr. 6

Nomogram pro stanovení
počtu otáček



Obr. 7 Graf k určení počtu otáček

Název odlitku	kov	osa rotace	forma	zvláštní podmínky	gravitační koeficient g min.	R- r	Poznámka
pouzdra traktorů	šedá litina	horizont.	kovová s nátěr.	povrch formy pokr.žár. vzd.nátěrem	30,4	1,17	
dtto	dtto	dtto	písk.		40	1,17	
různá pouzdra	dtto	dtto	kov.s.nát.	povrch-písek	32-89		
kokily a raznice				odl.s ostrými mi hranami	13,4	2,5	korekce podle tloušť.
trubky vodovod.	dtto	horizont. sklon 30	dtto	forma bez nátěru	15-17	1,1-1,17	
dtto	dtto	dtto	písk. suchá	trubky d. do 6,5 mm	31-49	1,1-1,17	při odlévání K-61-74
plný odlitek	ocel.u.	vertik.	kovová s nátěr.	výš.1,7 mm tl. 20 mm	73	1,2-5	
tlustostěn. odlitky	uhl.oc. nízko- leg.	horiz.	kovová s nátěr.		amax podle obv.rych. 25-30		kontrola na max. tlak
pouzdra	bronz	dtto	kovová		3,3	1,55	
velká pouzdra	0,3-5-25 bronz až 9-4	dtto	dtto		16,4	1,16	
malá pouzdra	růz.sl. mědi a hliníku	vertik.	dtto		40		a podle výšky od pouzdra
pouzdra a kola	silumin Si do 8%			teplota formy 180-200°C	80-120		
dtto	silumin Si do 11-12%	dtto	dtto	dtto	30-50		

Název odlitku	kov	osa rotace	forma	zvláštní podmínky	gravitační koeficient Q min.	$\frac{R}{r}$	Poznámka
pouzdra a kola	čistý Al	dtto	kovová	dtto	13-25		
dtto	dtto	dtto	písková	dtto	20-25		
rotory elektromot.	hliník	vertik.	kovová	forma ohřátá na 300-400°C	6-11		
dtto	dtto	dtto	dtto	forma chladná	280		

Tab. č.1 Určování gravitačního
koeficientu Q

2.2.3. ÚČINEK ROTACE NA VMĚSTKY V ROZTAVENÉM KOVU

Při odstředivém lití působí na každou částici, tedy i na vměstek síly :

- odstředivá
- vztlačová /dle Archimedova zákona/

Matematické znění Archimedova zákona :

$$F_{vz} = g\rho_v V - g\rho_k V = Vg(\rho_v - \rho_k) \quad (27)$$

kde :

F_{vz} - vztlačová síla /N/

ρ_v - hustota nekovového vměstku ponořeného do tekutého kovu /kgm⁻³/

ρ_k - hustota tekutého kovu /kgm⁻³/

V - objem ponořeného vměstku /m³/

Při působení odstředivé síly platí :

$$F_o = V \cdot \omega^2 \cdot r \cdot (\rho_v - \rho_k) \quad (28)$$

kde :

F_o - odstředivá síla působící na vměstek /N/

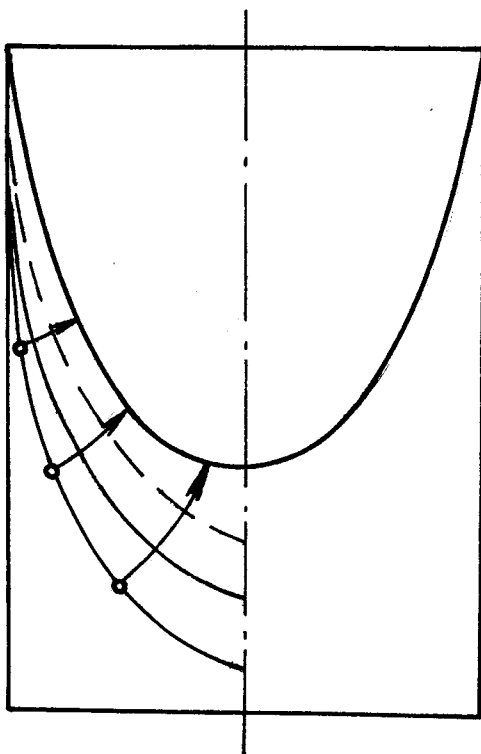
- úhlová rychlost otáčení formy /s⁻¹/

r - vzdálenost středu setrvačných sil ponořeného objemu od osy otáčení /m/

Výslednice sil F_{vz} a F_o je potom :

$$F_c = V \cdot (\rho_v - \rho_k) (g - r \cdot \omega^2) \quad (29)$$

Při rotaci kolem vertikální osy vyplouvají vměstky po křivce naznačené na obr. 8. Trajektorií bude křivka, která je v libovolném bodě normálou k okamžité hodnotě povrchu paraboloidu.



Obr. 8 Schéma vyplouvání vměstků

2.3. ODSTŘEDIVÉ STROJE A JEJICH ROZDĚLENÍ

Dle použití technologie odstředivého lití můžeme dělit stroje do tří základních skupin :

1. Stroje s vodorovnou osou rotace
2. Stroje se svislou osou rotace
3. Stroje se skloněnou osou rotace

Na konstrukci stroje jsou kladeny značné požadavky. Především musí stroj splňovat dostatečnou tuhost, aby se zamezilo chvění a vibracím při větším počtu otáček, protože se snižuje

mez únavy rotujících součástí. Je třeba se vyhnout i otáčkám, při nichž nastává rezonance. Otáčky se dají měnit několikerým způsobem :

- použitím elektromotorů s možností plynulé regulace
- zařazením převodových skříní s možností plynulé regulace
- zařazením převodových skříní s možností skokové regulace

2.3.1. HORIZONTÁLNÍ LICÍ STROJ

Tento typ stroje se používá především k odlévání delších součástí. Konstrukční řešení stroje :

- s oboustranně uchycenou kokilou
- s letmo uloženou kokilou

2.3.2. VERTIKÁLNÍ LICÍ STROJ

Tento stroj je vhodný pro odlévání menších a středně velkých odlitků, např. kroužky, pouzdra, segmenty, jejichž výška nepřevládá nad průměrem. Je též vhodný pro poloodstředivé lití. Maximální rozměry zhotovených odlitků :

- výška 300 mm
- průměr 400 mm
- hmotnost do 30 kg

2.3.3. VOLBA LICÍHO STROJE

Při volbě druhu licího stroje je nutno přihlížet k :

- velikosti součásti
- tvaru součásti
- vnějšímu a vnitřnímu průměru
- způsobu, jakým lze plnit formu

Například krátká pouzdra, věnce, kroužky a podobné součásti, které mají menší průměr než délku, odléváme na licím stroji s horizontální osou rotace s letmo uloženou kokilou, součásti příliš těžké odléváme na stroji s vertikální osou rotace.

2.4. SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU /5/

Slévárenské slitiny hliníku mají na rozdíl od tvářených vyšší obsah legujících prvků a obvykle jsou ve dvoufázové oblasti. Při chladnutí dochází k segregaci přísady. Charakter segregace i způsob vyloučení závisí na složení slitiny a podmínkách ochlazování.

Optimální slévárenské vlastnosti mají slitiny přibližně eutektického složení. Nejvýznamějšími slévárenskými slitinami hliníku jsou slitiny typu AlSi. Podle složení jsou slitiny AlSi buď podeutektické / s obsahem Si pod 12%/, eutektické / s obsahem kolem 12% / a nadeutektické / s obsahem Si 12-24%/. Vedle binárních slitin AlSi jsou často používány slitiny s jinými přísadami /např. Mg nebo Mn/, které jsou vhodné k vytvrzování.

Vyžaduje-li se u odlitků z hliníkových slitin zvýšená odolnost proti korozi a je-li nutná povrchová úprava, volíme jako přísadu hořčík. Přídavkem křemíku a manganu se dosahuje zlepšení slévatelnosti i mechanických vlastností.

Podle způsobu výroby odlitků rozdělujeme slitiny na vhodné pro lití do písku, do kokil, pod tlakem nebo odstředivě. Slitiny pro lití pod tlakem a odstředivě jsou vlastně výběrovými slévárenskými slitinami u nichž se požaduje velmi dobrá zabíhavost. Tímto způsobem lze získat odlitky velmi složité, s minimální tloušťkou stěny, přesného tvaru a hladkého povrchu.

Slitiny hliníku dělíme do dvou základních skupin :

1. Slitiny hliníku prvního tavení
2. Slitiny hliníku druhého tavení

Slitiny prvního tavení se vyrábějí z nových surovin, obsahují méně nečistot a slouží k odlévání více namáhaných odlitků.

Slitiny druhého tavení se získávají přetavováním a rafinací odpadu.

Slitiny AlMg mají ze všech slitin hliníku nejlepší korozivzdornost, nejmenší hustotu a jsou dobře leštitelné.

Přehled nejpoužívanějších slévarenských slitin hliníku, jejich chemického složení a mechanických vlastností je uveden v tabulce č. 2.

ČSN	Hlavní kovy tvořící slitinu	odlitý P - do tvářecího kovu K - do kovu	Chemické složení %/ /Čísla v závorkách značí množství nečistot v %/									
			Cu	Mg	Mn	Si	Ti	Ni	Cr	Sb	Zn	Fe
424515	AlMg5	P	/0,05/	4,5-5,5	0,1-0,5	0,6-1,5	/0,3/	-	/0,3/	/0,3/	/0,1/	/0,5/
		K	/0,05/	4,5-5,5	0,1-0,5	0,6-1,5	/0,3/	-	/0,3/	/0,3/	/0,1/	/0,5/
424517	AlMg7	P	/0,05/	6-7,5	0,1-0,5	0,6-1,5	0,3	-	/0,3/	/0,3/	/0,1/	/0,5/
		K	/0,05/	6-7,5	0,1-0,5	0,6-1,5	0,3	-	/0,3/	/0,3/	/0,1/	/0,5/
424330	AlSi13	P	/0,1/	/0,1/	0,3-0,5	10-13	/0,15/	-	-	-	/0,1/	/0,6/
		K	/0,1/	/0,1/	0,3-0,5	10-13	/0,15/	-	-	-	/0,1/	/0,6/
424384	AlSi10	P	/1,6/	/0,5/	0,2-0,5	7-11	-	/0,5/	-	-	/1,0/	/0,2/
druhá tavba		K	/1,6/	/0,5/	0,2-0,5	7-11	-	/0,5/	-	-	/1,0/	/0,2/
424332	AlSi7	P	/0,2/	0,2-0,4	/0,5/	6-8	-	-	-	-	/0,3/	/0,6/
		K	/0,2/	0,2-0,4	/0,5/	6-8	-	-	-	-	/0,3/	/0,6/
424335	AlSiCu	P	0,7-1	-	0,25-0,45	13,5	-	-	-	-	-	/0,6/
		K	0,7-1	-	0,25-0,45	13,5	-	-	-	-	-	/0,6/
424331	AlSiMg	P	/0,1/	0,2-0,4	0,3-0,45	9-10	/0,15/	-	-	-	/0,05/	/0,6/
		K	/0,1/	0,2-0,4	0,3-0,45	9-10	/0,15/	-	-	-	/0,05/	/1,0/

Tab. č.2

Přehled chemického složení
a mechanických hodnot
hliníkových slitin.

* tepelně nepracováno
** tepelně vytvrzeno

ČSN	Re /MPa/		Rm /MPa/		A %/		HB		Použití
	*	**	*	**	*	**	*	**	
424515	90	-	160	-	2	-	55	-	dobře leštitel. elektrolyt.ox.
	90	-	170	-	3	-	60	-	
424517	110	120	150	190	2	2,5	65	70	dtto
	120	130	200	260	5	5	70	70	
424330	80	-	170	-	4	-	50	-	tenkost.odlit. rázu.vzdorná
	90	-	180	-	3	-	55	-	tenkost.odlit. dyn.namáh.
424384	80	-	140	-	1	-	50	-	pro součástky v letec.průmys.
	80	-	180	-	1	-	55	-	tenkost.odlit. dyn.namáh.
424332	-	-	160	200	2	2	50	60	pro součástky v letec.průmys.
	-	-	160	210	2	2	50	60	pro součástky pro lodní dopravu
424335	80	-	170	-	2	-	50	-	pro slož.odlit. stříd.namáh.
	90	-	180	240	2	0,4	60	80	
424331	-	-	180	250	0,3	0,4	65	85	

2.5. TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Tyto slitiny lze tavit v kelímkových pecích, ale v poslední době se stále více rozšiřují pece indukční. K dobrému průběhu přípravy slitin je důležité použít i rafinačních a odplyňovacích přípravků. Mezi nejběžnější používané rafinační přípravky můžeme uvést slitinu :

33% NaCl, 33% KCl, 34% MgCl₂

Odlévání hliníkových slitin se provádí jak do pískových forem, tak i do kokil. Odlévání do kokil se používá s výhodou při sériové výrobě. Kokily jsou nejčastěji vyráběny ze šedé litiny, případně z oceli. Z těchto materiálů nebo i pískových směsí se také vyrábějí jádra.

Hliníkové slitiny se často odlévají gravitačně do pískových forem. Velmi rozšířené je také jejich odlévání do kovových forem pod tlakem.

Odstředivé kokilové lití hliníkových slitin se provádí pouze vyjimečně. V tomto případě se používají válcové kokily, které se otáčejí kolem své osy. Při lití slitin hliníku se této metody používá např. při lití ložiskových pouzder nebo rotorů asynchroních elektrických motorů. Používá se jen tehdy, jde-li o malé série a lití pod tlakem by bylo nevhodné.

2.6. TUHNUTÍ ODLITKŮ Z HLINÍKOVÝCH SLITIN V KOVOVÝCH FORMÁCH /KOKILÁCH/

Průběh krystalizace je závislý na krystalizační schopnosti pro tvorbu krystalových zárodků. Nejvýhodnější jsou místa u stěny kokily, kde dochází k potřebnému přechlazení taveniny. Tvorbu zárodků ovlivňuje především rychlost ochlazování a to

tak, že při pomalém ochlazování se tvoří malý počet zárodků a vzniká malý počet krystalů, které rostou do velkých rozměrů /struktura odlitků je hrubozrná/.

Naproti tomu při rychlém ochlazování se počet zárodků rychle zvyšuje a vzniká mnoho drobných krystalů /výsledná jemnozrná struktura/. Vznik zárodků je také podporován přítomností drobných částí cizích těles v tavenině, např. oxidů, karbidů, intermetalických fází nebo přímo očkovacích přísad.

Růst krystalů a krystalizačních center je ovlivňován směrem odvodu tepla. Přednostní růst v určitých krystalografických směrech a rovinách je základem vzniku dendritické struktury. 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 sloupkovitých krystalů se zmenšováním se intervalů tuhnutí jak uvádí KOLEKTIV /6/.

Dendritická krystalizace je zdrojem nehomogenního chemického složení. Vliv této nehomogenity je příčinou praskání odlitků, protože v oblastech bohatých na přísady se vylučují křehké fáze za vyšších teplot.

Při stěně kokily, kde je velmi vysoké podchlazení vzniká pásmo velmi jemných rovnoosých krystalů. Za touto krystalizační frontou jsou vytvořeny podmínky pro vznik sloupkovitých krystalů.

Konečně poslední oblast je tvořena polyedry /rovnoosými dendrity/. V důsledku tuhnutí kovů a jejich slitin dochází také k prudké změně rozpustnosti plynů v daném kovu. Toto lze odstranit volbou vhodné technologie odlévání, popřípadě volbou vhodné formovací směsi.

Při tuhnutí dochází také ke smršťování, což je v podstatě

zmenšování rozměrů odlitků vzhledem ke kokile. Má za následek vznik mikropórů, staženin a vnitřních pnutí. Při tuhnutí mohou jednotlivé větve dendritů uzavřít zbylou taveninu a tím znemožnit krytí objemových ztrát. Následkem je vznik ředin.

Nedostatečnou dodávkou taveniny při tuhnutí mohou vzniknout i větší soustředěné dutiny - staženiny, které nám v některých případech znehodnotí celý odlitek.

2.6.1. SEGREGACE

Změny ve složení krystalů a taveniny během krystalizace jsou příčinou segregace přísadového prvku ve ztuhlé slitině. Mikrosegregací rozumíme nestejnorodosti složení na malé vzdálenosti /t.j. v dendritech a zrnech slitiny/, makrosegregace je nestejnorodost mezi povrchem a středem ingotu nebo odlitku.

Mikrosegregace vzniká nedokonalou difuzí v tavenině a zejména v krystalech. Je výrazná zejména při dendritické krystalizaci, kde hlavní a vedlejší osy dendritů mají často značně odlišné složení od mezidendritických prostorů.

Následkem makrosegregace při tuhnutí ingotů mají části středové /v ose/ většinou větší obsah přísady než povrchové. Je to dáno tím, že poslední části tuhnoucí taveniny jsou nejbohatší na rozpuštěnou složku. Rozdílnému složení krystalů říkáme dendritická nestejnorodost. Lze ji z velké části odstranit homogenizačním žíháním.

2.6.2. ODMĚŠOVÁNÍ /6/

Odměšováním odlitků označujeme obohacení určitých jeho čás-

tí snadněji tavitelnou složkou slitiny. Odměšování způsobuje nestejnouměrnost slitiny, pokud jde o její fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti.

Rozlišujeme tyto druhy odměšování :

- gravitační
- dendritické
- pásmové
- přímé
- opačné /obrácené/

Odměšování dendritické, interkrystalické, vzniká, je-li během tuhnutí zadržena mezi dendrity snadněji tavitelná část slitiny.

Při odměšování gravitačním rozdílem měrných hmotností stoupají snadněji tavitelné složky slitiny vzhůru a nesnadněji tavitelné klesají do spodní části ingotu.

K odměšování pásmovému dochází, má-li tavenina široké rozmezí teplot tuhnutí.

Při odměšování přímém se snadněji tavitelné složky slitiny vyskytují uprostřed ingotu.

Odměšování opačné /obrácené/ je takové, že snadno tavitelné složky slitiny jsou při povrchu nebo na povrchu ingotu. Dochází k němu tehdy, když snadno tavitelné části slitiny nacházející se uprostřed ingotů, jsou vytlačeny na povrch mezisotva ztuhlé větve dendritů účinkem smrštění nebo hydrostatického tlaku.

Opačné odměšování se někdy projevuje výpotky a výronky na povrchu ingotu, které zhoršují jakost povrchu. Zplodiny opačné segregace mohou být též příčinou trhlin při plastické deformaci

protože jsou většinou velmi křehké.

ODMĚŠOVÁNÍ PŘI Odstředivém LITÍ /4/

V rotující formě dochází současně s vypuzením plynových a struskových vměstků i k rozvrstvení samotného kovu. Vysvětlujeme si to tím, že hustota primárního krystalu se nerovná hustotě taveniny a vlivem tohoto rozdílu i působením odstředivé síly se bude krystal přemisťovat v radiálním i vertikálním směru podle vztahu :

$$F = V \cdot (\rho_K - \rho_{TAV}) \cdot r \cdot \omega^2 \quad (30)$$

kde :

r - vzdálenost středu krystalu od osy otáčení /m/

ω - úhlová rychlost /s⁻¹/

ρ_K - hustota primárního krystalu /kgm⁻³/

ρ_{TAV} - hustota taveniny /kgm⁻³/

V - objem primárního krystalu /m³/

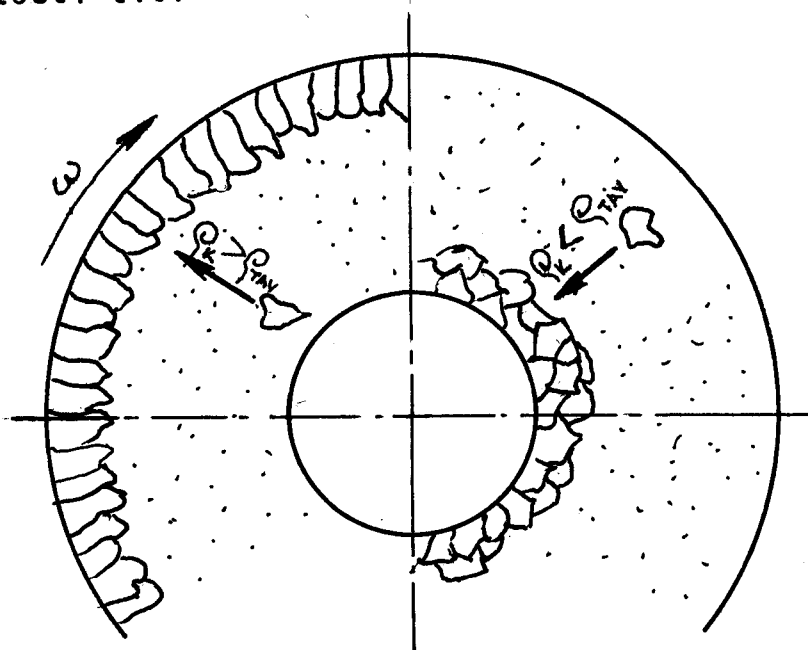
F_c - odstředivá síla /N/

Je-li $\rho_K > \rho_{TAV}$, pak $(\rho_K - \rho_{TAV}) > 0$, vliv odstředivé síly je kladný a primární krystal se bude pohybovat ke stěně formy. Naopak je-li $\rho_K < \rho_{TAV}$, pak $(\rho_K - \rho_{TAV}) < 0$, a krystal bude vlivem odstředivé síly zatlačován k ose otáčení, na vnitřní povrch odlitku. Tím nastává obrácené odměšování.

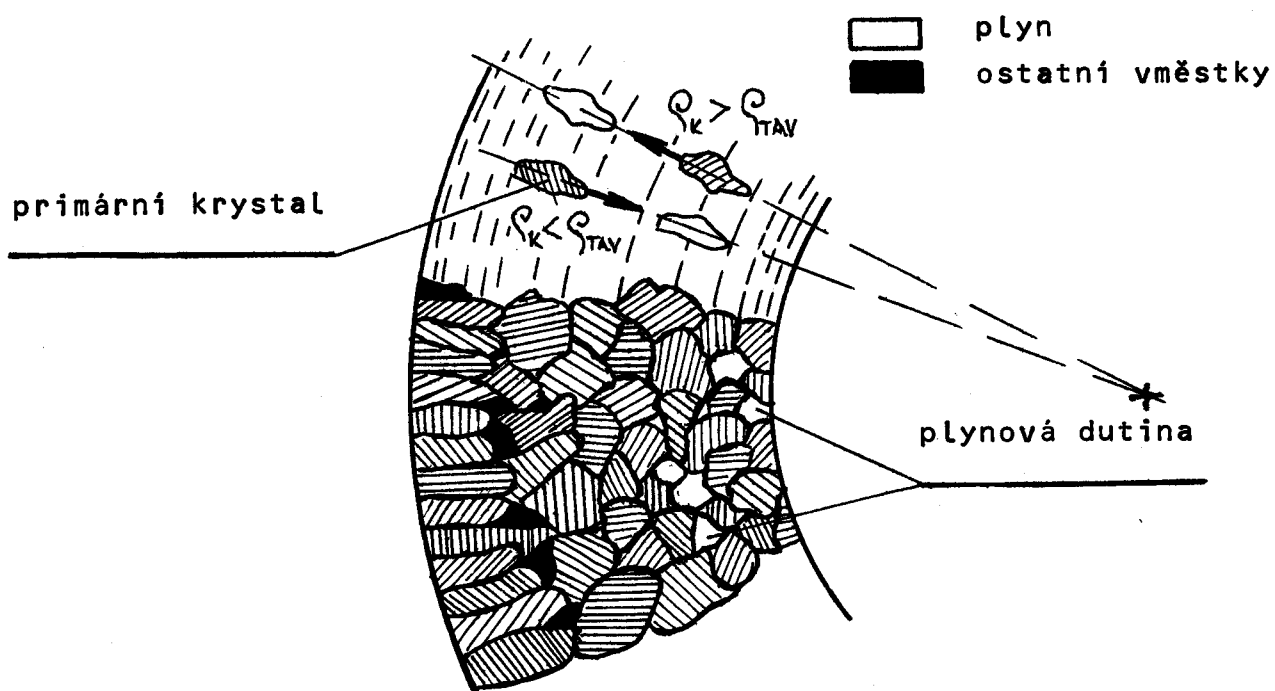
V prvním případě se bude primárními krystaly obohacovat vnější část odlitku a v druhém případě se jimi bude obohacovat jeho vnitřní část. Kromě přímého nebo obráceného odměšování se v odlitku objevují i pásmová odmišení v podobě soustředěných pásů. Vznik těchto pásů závisí :

1. na složení slitiny

2. na rychlosti otáčení formy
3. na rychlosti krystalizace
4. na rychlosti lití



Obr.9 Schema krystalizace odstředivého odlitku ze slitiny tuhnoucí v intervalu teplot



Obr.10 Schema ukazující obrácené a přímé odměšování

2.7. TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

2.7.1. SLÉVATELNOST

Slévatelnost slévárenských slitin je ovlivněna řadou dalších fyzikálních vlastností /měrné teplo, skupenské teplo tání, tepelná vodivost, roztažnost, teplota tavení, viskozita, způsob tuhnutí, povrchové napětí, lící teplota, druh a teplota formy, tepelná akumulace formy atd./.

Jak je obecně známo velmi dobrou slévatelnost vykazují slitiny blížíci se svým složením eutektickému. Jsou také méně viskózní a proto vykazují i dobrou zabíhavost ve formě, kterou také dokonale vyplňují. Tato slitina tuhne při jediné teplotě a proto mají odlitky velmi malé smrštění.

To je také příčinou proč eutektické slitiny nemají sklon k praskání za tepla jak uvádí KOLEKTIV /6/. Slitiny, které mají velký interval tuhnutí, jsou náchylné na oxidaci. Vrstva oxidů tvořící se na povrchu zhoršuje slévatelnost takových slitin.

2.7.2. SKLON K TRHLINÁM A PRASKLINÁM

Pokud v intervalu tuhnutí existují dvě fáze - kapalná a tuhá, vytvářejí se v odlitku trhliny. Sklon ke vzniku trhlín je tím menší čím menší je interval tuhnutí slitiny a také čím je jemnější zrno.

Praskliny pak vznikají za teploty podstatně nižší, v důsledku vnitřního prnutí odlitku během chladnutí slitiny. Vznik prasklin je možno eliminovat zpomalením chladnutí, vhodnou konstrukcí odlitku atd.

2.8. SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

Schopnost kovů a jejich slitin tvořit kvalitní odlitky závisí na jejich slévárenských vlastnostech. Jsou to jedny z nejdůležitějších vlastností, které přispívají k velkému rozšíření odlitků ve strojírenství.

Slévárenské vlastnosti některých slitin hliníku jsou uvedeny v tab. 3.

2.8.1. TAVITELNOST

Tavitelnost je schopnost kovů a jejich slitin přecházet z tuhého do kapalného stavu. Nezávisí jen na hodnotě teploty tavení slitiny, ale i na celkové spotřebě tepla, potřebného k ohřátí slitiny na teplotu lití. Uvažujeme-li místo slitiny čistý kov, pak pro množství jednoho kilogramu je třeba dodat teplo :

$$Q = c_s(T_{ta} - 20) + Q_t + c'_s(T_l - T_{ta}) \quad (31)$$

kde :

c_s - střední specifické teplo tuhé fáze /J.mol⁻¹.K⁻¹/

c'_s - střední specifické teplo kapalné fáze /J.mol⁻¹.K⁻¹/

T_{ta} - teplota tavení /°C/

T_l - teplota lití /°C/

Q_t - latentní teplo tavení /J.kg⁻¹/

S počtem komponentů pak tavicí teplota klesá.

Jak již bylo řečeno, nejlépe tavitelné jsou slitiny eutektické, kdy tavení probíhá izotermicky.

Slitina AL dle ČSN	Druh slitiny	Sléva- telnost	Svaři- telnost	Obrobi- telnost	Mech. leš- titelnost	Možnost anodické oxidace	Korozivzdornost v atmosféře
424330	ALSi30	výborná	výborná	dobrá	vyhov.	neuživ.	velmi dobrá
424331	ALSi10Mg	výborná	výborná	dobrá	dobrá	neuživ.	velmi dobrá
424332	ALSi7	velmi dobrá	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	nevyhov.	výborná
424338	ALSi8Cu4	výborná	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá	nevyhov.	vyhovující
424381	ALSi5Cu2	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	vyhov.	vyhovující
424515	ALMg5	dobrá	dobrá	výborná	výborná	výborná	výborná
424518	ALMg11	vyhov.	vyhov.	výborná	výborná	výborná	výborná

Tab. č.3 Přehled slévarenských slitin hliníku /6/.

2.8.2. TEKUTOST

Tekutost závisí na vzájemné pohyblivosti jednotlivých částic taveniny za dané teploty. Velká tekutost umožňuje dobré zaběhnutí taveniny do formy.

2.8.3. ZABÍHAVOST

Zabíhavost je jedna z nejtypičtějších slévárenských vlastností. Není závislá jen na vlastnostech použité slitiny, ale i na lících podmínkách, vlastnostech formy, uspořádání vtokové soustavy atd. Z hlediska hliníkových slitin mají nejlepší zabíhavost slitiny se složením přibližně eutektickým tj. AlSi 12, AlSi 10 Mg, AlSi 12 CuNiMg.

Zabíhavost lze do značné míry ovlivnit lící teplotou.

Proto pro tenkostěnné odlitky volíme lící teplotu poněkud vyšší než pro dolitky silnostěnné. Na zabíhavost má také vliv předeřtání kovové formy, vhodné konstrukce vtokové soustavy, zvýšení tlaku nebo otáčky kokily.

Zabíhavost se posuzuje podle spirálové zkoušky, která pro danou slitinu a při dodržení potřebných podmínek dává výsledky s maximálními odchylkami $\pm 5\%$. Zabíhavost některých slitin hliníku je uvedena v tab. č.4.

Typ materiálu	Odpovídá přibližně materiálu dle ČSN	Délka spirály/%
Al 99,99	424330	100
AlSi 13		92
AlSiCu		82
AlSi 13 modif.		80
AlSiCu modif.		70
AlSi6Cu3	424381	70
AlSi5Cu1	424380	65
AlMg5	424515	60

Tab.č.4. Zabihavost některých slitin vyjádřená v procentech délky spirály vyplněné čistým hliníkem pro lici teplotu 750° C.

2.8.4. SMRŠŤOVÁNÍ A STAHOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH ODLITKŮ

Pod pojmem smršťování rozumíme rozměrové změny, ke kterým dochází po ztuhnutí odlitku. Některé hodnoty smrštění odlitku jednotlivých hliníkových slitin jsou uvedeny v tab. 5. Experimentálně bylo zjištěno, že při odlévání do kokil je smrštění menší než při odlévání do pískových forem.

Se smršťováním slitin při tuhnutí je spojen vznik staženin a vnitřního pnutí. U tvarových odlitků jsou nejnepříznivější staženiny rozptýlené po celém objemu odlitku.

K odstranění staženin z vlastního odlitku se používá vhodných nálitků. Hliník a jeho slitiny se proti např. šedé litině

stahují více.

Slitiny s malým intervalem tuhnutí vykazují spíše staženiny soustředěné a slitiny s větším intervalem tuhnutí tvoří staženiny rozptýlené. Na velikost staženiny má také vliv technologie tavení a konstrukce odlitků jak uvádí PŘIBYL /7/.

Slitina hliníku dle ČSN	Druh slitiny	Smrštění odlitků /%/		
		lití do písk.forem	lití do kokil	lití pod tlakem
424330	AlSi13	1,0-1,15	0,5-0,8	0,4-0,6
424331	AlSi10Mg	1,0-1,10	0,5-0,8	0,4-0,6
424332	AlSi7	1,0-1,20	0,8-1,0	0,4-0,6
424338	AlSi8Cu4	1,0-1,20	0,8-1,0	-
424381	AlSi5Cu2	1,0-1,10	-	0,5-0,8
424515	AlMg5	1,0-1,50	0,8-1,3	0,5-0,7

Tab.č.5 Směrné hodnoty smrštění odlitku

2.9. VADY ODLITKŮ /6/

Při výrobě odlitků se projevují vlivem nedodržení určitých technologických podmínek na finálním výrobku určité vady. Vadou odlitků se rozumí každá odchylka rozměrů, hmotnosti, vzhledu, makrostruktury nebo vlastností zjištěných laboratorními zkouškami od příslušných norem nebo sjednaných podmínek. V normě ČSN 421240, která je platná pro všechny slévárenské slitiny /odlévání kterýmkoliv technologickým způsobem/, se vady třídí do 7 skupin :

1. vady tvaru, rozměru a hmotnosti
2. vady povrchu
3. přerušeni souvislosti
4. dutiny
5. vměstky
6. vady struktury
7. nesprávné fyzikální vlastnosti a složení

Vady mohou být zjevné nebo skryté. Zjevná vada je zjistitelná pouhým okem na neobrobeném odlitku, kdežto vadu skrytou je nutno indikovat pomocí vhodné přístrojové techniky.

U hliníku a hliníkových slitin vznikají nejčastěji vady, které jsou způsobeny :

a/ rychlým vznikem oxidických povlaků při odlévání např. zavalením. Zvláště nepříznivě ovlivňuje výskyt těchto vad přerušeni lití, malá rychlost lití nebo u odstředivých odlitků příliš velké otáčky formy.

b/ nesprávným návrhem nebo špatnou výrobou formy.

Z těchto příčin vznikají např. zatekliny, nezaběhnutí, zálupy, bubliny, staženiny, zadrobeniny, řediny atd.

Studium slévárenských vad má velkou důležitost pro hospodár-
nou výrobu ve slévárně, neboť vede ke zlepšení jakosti odlitků
a snížení počtu zmetků. Zvýšením produkce dobrých odlitků se
zlepšuje i výroba při obrábění a při montáži strojních celků.

3.0. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální řešení této diplomové práce je zaměřeno na vývoj a zdokonalení technologie výroby rozváděcích válců pro textilní stroje. Již dříve se zabýval návrhem zařízení pro odlévání podobných válců FERČÁK /4/. Navržené zařízení vyhovovalo dané technologii, pro uplatnění výhodné slitiny hliníku z hlediska rotačního odlévání.

Textilní stroje pro které jsou válce určeny mají splňovat jak pevnostní, tak i trvanlivostní podmínky, a proto k.p. Eli-tex přistoupil na zdokonalení válců. Jeho hlavním požadavkem bylo navrhnout vhodnou slitinu hliníku, která by měla jednak dobré slévárenské vlastnosti a také se dala povrchově upravovat eloxováním, pro zvýšení životnosti a odolnosti proti otěru nití.

Odlévání válců bylo provedeno v podmínkách katedry materiálů a strojírenské metalurgie na stávajícím zařízení, které bylo k tomuto účelu již navrženo na výrobu jiného druhu rozváděcích válců.

3.1. POPIS ZAŘÍZENÍ

Hnací jednotkou je dvoupólový trojfázový asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko o výkonu 750 W. Rozběh a otáčky tohoto elektromotoru jsou ovládány pomocí autotransformátoru. Toto řešení otáček se v praxi ukázalo jako neuspokojivé, proto se v závěru práce zabývám návrhem vhodnějšího způsobu řízení otáček.

Motor je uchycen na kostře elektromotoru čtyřmi šrouby M 10. Kostra zařízení je svařenec, který tvoří základní deska, dvě vzpěry a dvě stojny. Na základní desce jsou otvory pro

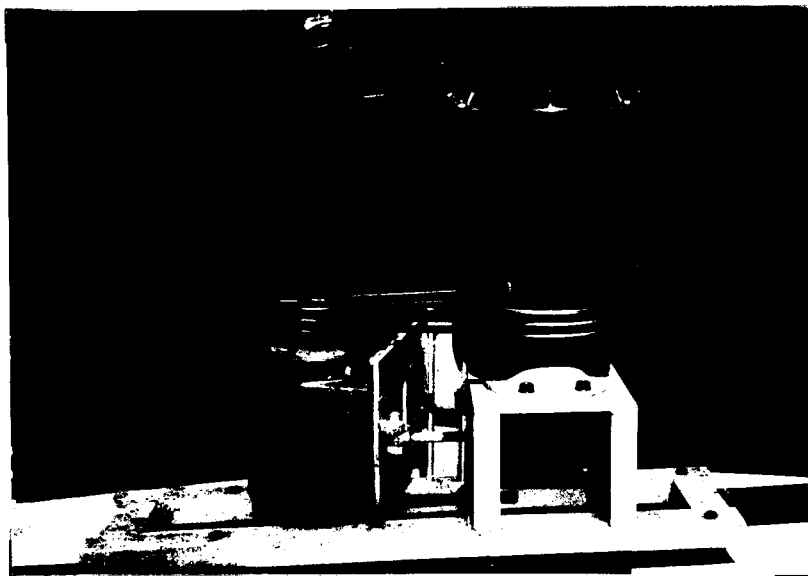
šrouby, jejichž tvary umožňují správné napnutí dvou klínových řemenů.

Klínové řemeny zajišťují přenos krouticího momentu z motoru na unášecí zařízení kokily.

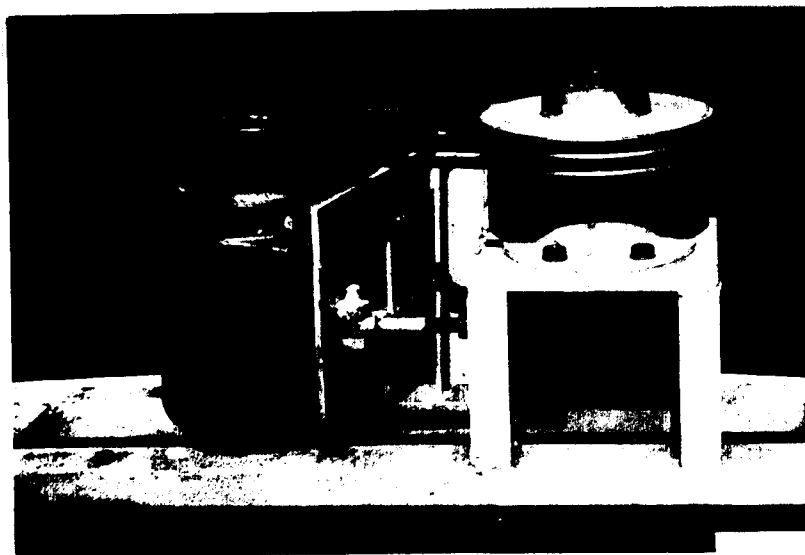
Vlastní unášecí zařízení je uchyceno ve třech ložiskách /dvě radiální a jedno axiální/, která zachycují vnější působící síly. Na unášecím zařízení je zhotoven kužel o úhlu zkosení 7° pro spojení se základní deskou kokily. Vlastní kokila je tedy uváděna do rotačního pohybu přes toto samosvorné spojení.

Kokila je tvořena ocelovým válcem o tloušťce stěny 12 mm s úkosem $1,5^{\circ}$, z důvodu snadného vyjímání odlitku. Dno kokily je zhotoveno z ocelového plechu, na jehož spodní straně je výše uvedený kuželový unašeč. Na horní straně je drážka pro osazení pláště kokily a kuželové vybrání pro vložení jádra. Kokila je uzavřena vrchní deskou, která má rovněž drážku pro středění pláště kokily a usazení jádra. Ve střední části této desky je otvor pro vložení pomocné části formy tzv. vyhrazováku.

Vyhrazovák je tvořen ocelovým válcem, který se vkládá do otvoru ve vrchní desce kokily. Jeho vnitřní část je opatřena kuželovou pískovou vložkou tloušťky zhruba 10 mm, která usnadňuje odlévání a zamezuje předčasnému ztuhnutí nálitku /vtokové soustavy/. K výhodám vyhrazováku patří také kromě bezpečnějšího odlévání i rychlejší plnění formy roztaveným kovem, což příznivě ovlivňuje kvalitu a tuhnutí odlitku. Celkový pohled na zařízení je na obr. 11a, b.



a/



b/

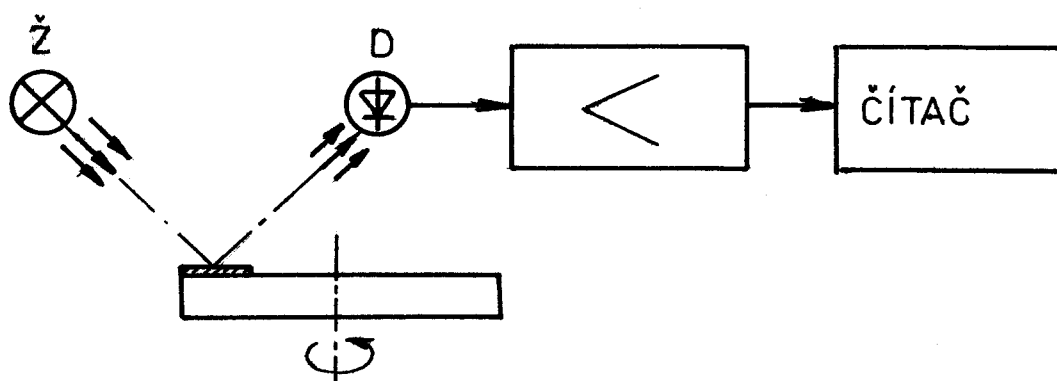
Obr. 11 Celkový pohled na lící stroj

a/ s kokilou

b/ bez kokily

Při rotačním odlévání byly v průběhu odlévacího cyklu sledovány otáčky kokily. Pro tento případ jsem použil bezkontaktního měření.

Princip měření je naznačen na obr.12.



Obr.12 Blokové schema bezkontaktního měření otáček

Pomocí fotodiody D, jsou světelné impulsy odražené ze žárovičky Ž, reflexní ploškou na řemenici snímány, zesílené a upravené v zesilovači a přivedeny na vstup digitálního čítače, kterým jsou zpracovávány. Na displeji čítače se potom v sekundových intervalech objevují přímo měřené otáčky $/\text{ot.s}^{-1}/$. Toto měření se v praxi ukázalo jako velmi přesné, což umožnilo nastavit optimální otáčky, zvolené pro danou technologii odstředivého lití.

3.2. VÝROBA JADER

Pro výrobu jader byl použit dřevěný jaderník, sestavený pro snadnější vyjímání jádra s osmi samostatných segmentů. Jeho

funkční část je opatřena nátěrem. Pro zaformování vtokové soustavy byl použit kužel ze slitiny hliníku, jak uvádí RADĚJ /3/.

Příprava jader ze směsi Habrinol :

Jádrová směs Habrinol je patentově chráněná formovací směs, složená z křemenného písku a pryskyřičného pojiva. Tato směs byla získána ve slévárně Liaz Ostašov. K vlastní přípravě je dodávána kyselina Habrinol a pryskyřice Habrinol.

Pro zhotovení směsi platí obecný postup :

- 10 kg křemičitý písek
- 140 g kyseliny Habrinol, míchat 1 minutu
- 240 g pryskyřice Habrinol, míchat 2 minuty

Směs je samovytvrditelná na vzduchu během 20 minut, tzn. že je nutno ji zpracovat do 5 minut po namíchání. Při práci s Habrinolem je nutno dbát bezpečnosti práce a používat ochranných pomůcek.

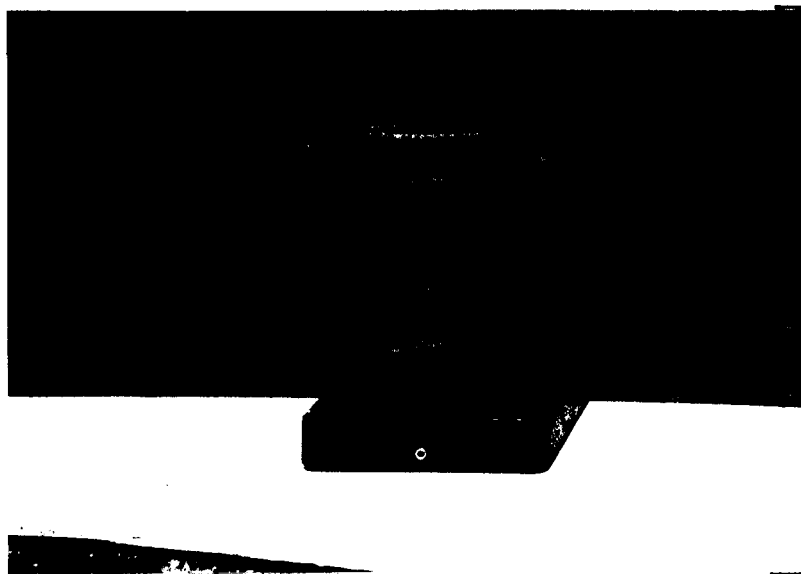
Postup výroby jádra :

1. Řádně vyčistit a složit segmenty dřevěného jaderníku.
2. Ručně vypěchovat členité tvary - žebra.
3. Založit vtokový kúl.
4. Dopěchovat.
5. Založit kroužek z hliníkové slitiny ke zlepšení usazení jádra v kokile a zarovnat čela jádra.
6. Vlastní samotuhnutí směsi.
7. Rozebrat jaderník - vyjmutí vtokového kúlu.
 - rozebrání segmentů jaderníku
8. Vyřezat dva vtokové zářezy o rozměrech 30x8 mm.

9. Apretace jádra /povrchová úprava/ v místech nedopěchovaných /řidkých/ míst a přebarvení směsi grafitu s vodou.

10. Konečné dosušování jádra z důvodu odpaření vody při teplotě 120°C , 2 hodiny.

Jaderník a hotové jádro jsou na obr. 13a, b, c.



Obr. 13a Pohled na hotové jádro



b/



c/

obr. 13 Pohled na jaderník
b/ rozložený
c/ sestavený

3.3. TECHNOLOGICKÝ POSTUP ODSTŘEDIVÉHO LITÍ

K vlastnímu odlévání byla jako slévárenská slitina použita slitina hliníku ČSN 424515.

Složení slitiny podle ČSN :

chemické složení : AlMg5Si1Mn

legující prvky : Mg 4,6 - 5,6 %

Si 0,6 - 1,3 %

doprovodné prvky : Cr 0,1

Cu 0,05

Fe 0,4

Ti 0,1

Zn 0,08

Pro odlití jednoho válce je potřeba zhruba pět kilogramů taveniny přehřáté na 730° C. Tavenina byla získána roztavením slévárenských housek /15 kg/ a vratného materiálu /vtoků a nálitků/ v elektrické odporové peci.

Před každým odléváním je nutno odstranit z roztaveného kovu oxidy, přidáním redukčního prášku. Pro zamezení vzniku vnitřních vad odlitku je nutno mechanicky odstranit i strusku.

Příprava formy k odlévání :

- předehřev kokily na 300° C
- založení jádra do známky ve spodní přírubě
- vyfoukání nečistot stlačeným vzduchem
- založení pláště kokily, horní desky a jejich zajištění křídlovými maticemi
- vložení vyhrazováku

Vlastní odlévání :

- roztočení kokily na 200 ot.min^{-1} a vlastní odlití, které by nemělo přesáhnout 10 sekund
- zvýšení otáček na 400 ot.min^{-1} a výdrž 120 sekund
- snížení otáček a vyjmutí vyhrazováku z důvodu snazšího uvolnění přetoků
- roztočení na $450-500 \text{ ot.min}^{-1}$ a výdrž až do úplného ztuhnutí
- ukončení rotace po 300 sekundách a vyjmutí odlitku
- konečné chlazení odlitku na vzduchu

3.3.1. ČIŠTĚNÍ ODLITKŮ

Čištění odlitků je dokončovací operací při odlévání a zahrnuje :

1. Vytlučení jádra. Proběhlo bez problémů vzhledem k velmi dobré rozpadavosti jádrové směsi Habrinol.
2. Oddělení vtoků.
3. Osekání otřepů a zčištění zbytků pozváděcích kanálků z vtokové soustavy.
4. Ruční čištění vnitřních částí od připečení.

3.4. VYHODNOCENÍ KVALITY VYROBENÝCH ODLITKŮ

Celkem bylo odlito 12 zkušebních válců jako ověřovací série pro potřeby k.p. Elitex. U všech válců byly postupně proměřeny vnější rozměry a získané hodnoty, které jsou uvedeny v tab. č.6 byly vyhodnoceny běžnou statistickou metodou :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (32)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (33)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (34)$$

kde :

$\bar{x}$ - střední hodnota daného rozměru /mm/

s - směrodatná odchylka /mm/

v - variační koeficient /%/

číslo měření	Ø větší /mm/	Ø menší /mm/	výška válce /mm/	
			l_1	l_2
1	170,2	165,9	180,6	180,4
2	170,0	166,4	180,5	180,4
3	170,4	166,0	180,6	180,5
4	170,1	165,1	180,4	180,4
5	170,5	166,4	180,4	180,5
6	170,2	166,2	180,4	180,4
7	170,0	166,1	180,4	180,3
8	170,2	166,2	180,2	180,5
9	170,0	166,0	180,3	180,3
10	170,3	166,3	180,3	180,5
11	170,2	166,3	180,3	180,4
$\bar{x}$ /mm/	170,19	166,08	180,4	180,42
s /mm/	0,164	0,366	0,126	0,0751
v /%/	0,096	0,22	0,069	0,042

Tab. 6 Rozměrová přesnost válců

A. Smrštitivost slitiny

Dle tabelárních údajů dosahuje smrštitivost slitiny hliníku ČSN 424515 hodnoty 0,97 %. Této hodnoty bylo téměř dosaženo i v praxi. Smršťení měřené na větším průměru válce má průměrnou hodnotu 0,98 %, smršťení měřené na menším průměru válce 0,982 %, smršťení měřené na výšce válce má hodnotu 0,99 %. Odchylky od průměrné hodnoty jsou patrně způsobeny licími podmínkami, hlavně pak teplotou předehřevu kokily, přehřátím taveniny, licí rychlostí atd.

B. Hodnocení povrchových vad a nerovností

Z celkového počtu 12 zkušebních rozváděcích válců byl pouze jeden zmetek. Vyskytly se u něj 2 slévárenské vady :

1/ Zavaleniny - patrně vznikly neslitím kovu předčasně ztuhlého a povrchově zoxidovaného ve formě. Zavaleniny jsou patrné na povrchu odlitku jako rýhy nebo prohlubeniny se zaoblenými kraji. Jsou způsobeny :

- přerušením lití do formy, kdy se roztavený kov ochladí a povrchově zoxiduje. Při následujícím pokračování v lití se dostane nově vlévaný kov na vrstvu dřívějšího kovu pokrytého oxidickou vrstvou a nedojde ke spojení. Rovněž malá lící rychlost a nízká teplota kovu způsobuje zavaleniny.
- při odstředivém lití, kdy docílíme naopak velké rychlosti lití a nemáme dostatečný počet rozváděcích kanálků jako v našem případě /dva rozváděcí kanálky/. Kov z prvního kanálku "vyletí" vlivem velké odstředivé síly po stěně kokily, ztuhne a zoxiduje, tzn. že další kov od druhého vtokového kanálku se s ním již nespojí. V našem případě nastala pravděpodobně tato varianta.

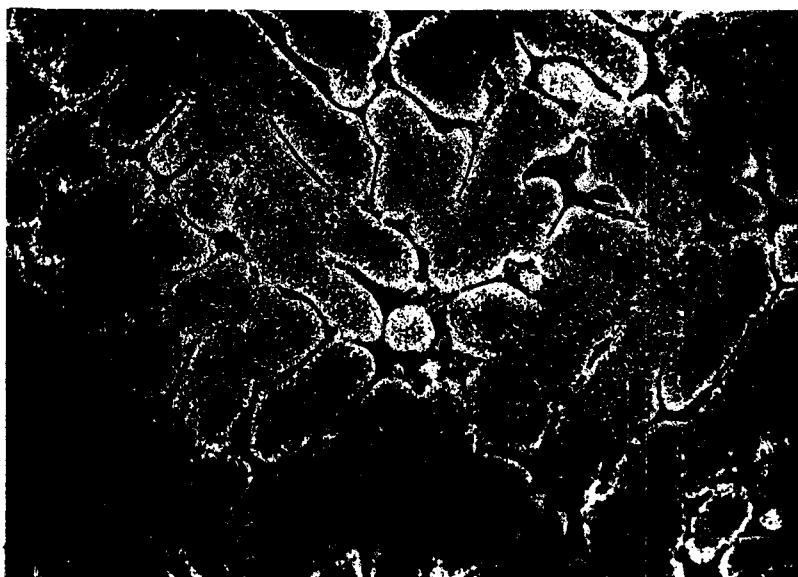
2/ Zadrobeniny - jsou povrchové nebo vnitřní dutiny ve stěně odlitku, vyplněné formovacím materiálem. V tomto případě byly zaviněny patrně osycháním nebo špatnou apretací jádra, popřípadě špatným vyfoukáním složené formy a poškozením jádra při jejím skládání.

Ostatní odlité válce byly prosty všech závažných slévárenských vad, kromě tenkých oxidických vrstev, které někdy vznikly na povrchu. Tyto však nejsou na závadu, protože se odstraní při konečném obrábění válců.

Pro porovnání byl odlit jeden válec gravitačním litím. U tohoto válce se projevily staženiny v tepelných uzlech /žebrech/, jak je vidět na obr. 14b v levé horní části.

3.5. STRUKTURA ODLITKŮ

U slévárenských slitin se posuzuje jejich jakost podle vzhledu lomové plochy. Proto byly namátkově vybrány z celé série válce, které byly rozříznuty v podélné ose včetně vtokového kůlu. Vzorky byly vybroušeny na metalografických brusných papírech o zrnitosti 240, 320, 400 a 600. Na nenaleptané struktuře lomové plochy byla zjišťována přítomnost vměstků, bublin, pórů atd a v místě rozváděcího kanálku byla sledována mikrostruktura dané slévárenské slitiny. Sledování bylo provedeno na světelném mikroskopu NEOPHOT 21 Carl Zeiss Jena při zvětšení 500 x. Mikrostruktura hliníkové slitiny je uvedena na obr. 15.



Obr. 15 Mikrostruktura Al slitiny
Leptáno : KELLER a WHILCOX

Pro vyvolání makrostruktury odlitku je třeba použít vhodného leptadla, aby byly krystaly dobře patrný po celé lomové ploše.

U zkušebních vzorků bylo použito leptadla o složení :

- destilovaná voda / H_2O / 25 ml
- kyselina fluorovodíková /HF/ 15 ml
- kyselina dusičná / HNO_3 / 15 ml
- kyselina solná /HCL/ 45 ml

Leptadlo bylo namícháno ve výše uvedeném pořadí z hlediska bezpečnosti práce a teplota okolí byla $23^{\circ}C$. Leptání bylo provedeno v misce, po celé ploše současně, přičemž doba leptání byla přibližně 15 s. Poté byl vzorek opláchnut destilovanou vodou a alkoholem.

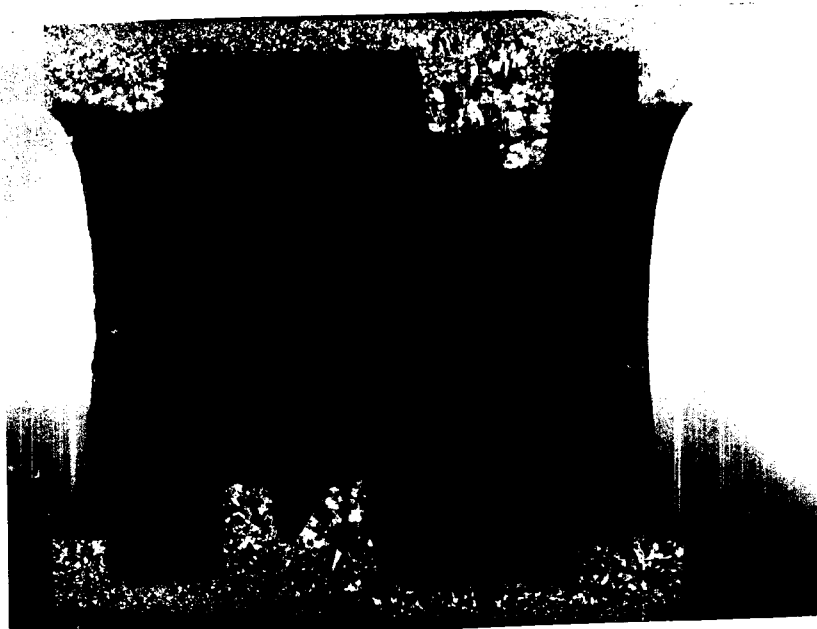
Po naleptání je struktura velmi výrazná. Působením odstředivé síly tzn. zvýšeného tlaku na roztavený kov a rychlejším odvodem tepla kokilou, je struktura v místech styku s kokilou velmi jemnozrná, bez pórů a vzduchových bublin.

V místech vtoku, vtokového kůlu a v místě žeber, kde dochází k menšímu odvodu tepla, jsou patrné větší dendrity orientované ve směru odvodu tepla. Póry, bubliny ani vměstky nejsou na odlitku patrné.

Rozložení struktury je vidět na ob. 14a.

U porovnávacího válce litého gravitačně je naopak struktura hrubozrná - dendritická, i u stěny kokily jsou patrné dosti velké krystaly natočené ve směru gradientu odvodu tepla. U válců vyrobených touto technologií byla po obrobení dodatečně zjištěna pórovitost.

Schéma rozložení této struktury je na obr. 14b.



a/



Obr. 14 Makrostruktura lomové plochy
a/ odlito odstředivě
b/ odlito gravitačně

3.6. MĚŘENÍ TVRDOSTI

Jak je ze způsobu namáhání válců patrné je důležitá především jejich povrchová tvrdost a z toho plynoucí otěruvzdornost, nehledě na to, že povrch válců je ke zvýšení povrchové tvrdosti po obrobení určený k eloxování. Při sledování tvrdosti byla zvolena zkouška tvrdosti podle Brinella ČSN 420371. Princip této metody je vtlačování kuličky o určitém průměru, určitou silou po zvolený čas. Pro lité slitiny hliníku platí :

$$F = 10 D^2 \quad (35)$$

kde :

D - průměr kuličky /m/

F - zatěžující síla /kp/

Průměr vtisku se má pohybovat v rozmezí $d = (0,25-0,6) \cdot D$

Doba působení síly je 30 sekund.

V tomto případě byl průměr kuličky : $D = 2,5$ mm.

Zatěžující síla byla : $F = 62,5 \text{ kp} = 615 \text{ N}$

Získané hodnoty tvrdosti byly statisticky vyhodnocené dle vzorců (32),(33),(34) a jsou uvedeny v tabulce 7.

Z tvrdosti slitiny byla orientačně vypočtena pevnost zkoušeného materiálu a tím se doplnily poznatky o uváděné slitině. Pro tento účel zjišťování pevnosti existují empirické vzorce nebo křivky, které však mají jen omezenou platnost a jsou určeny jen pro daný typ slitiny. Vztah mezi R_m a HB je přibližně :

$$R_m = (3-4) \cdot HB, \quad (36)$$

kde :

R_m - mez pevnosti v tahu /MPa/

HB - tvrdost podle Brinella /HB/

U zkoušených vzorků byla vypočtena $R_m \approx 230 \text{ MPa}$

číslo měření	1	2	3	4	5	$\bar{x}$ /HB/	s /HB/	v /%%/
HB rotačně	67	65	65	66	66	65,8	0,837	1,27
HB gravit.	66	65	66	65	65	65,4	0,547	0,837

Tab. č.7 Měření povrchové tvrdosti



Obr. 17 Celkový pohled na odlitek rozváděcího válce

4.0. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky, kterých bylo v předložené práci dosaženo přinášejí do technologie výroby rozváděcích válců informace, které zvyšují kvalitu jejich výroby. Výroba slévárensky složitých rozváděcích válců ze slitiny hliníku je velmi složitá a závisí na zvolené technologii procesu odlévání. Z toho je zřejmé, že pro optimální návrh celé technologie, je důležitý výběr takového způsobu, který přispívá ke kompaktnosti a celkové kvalitě vyráběných odlitků do kombinované formy - kovová kokila a pískové jádro. S takovými úvahami byla :

- a/ zvolena pro výrobu válců technologie odstředivého lití do kombinované formy - kovová kokila a pískové jádro, což je pro hliníkové slitiny neobvyklé, přičemž navržená technologie snižuje zmetkovitost pod 10 %.
- b/ zhodnocena nově navržená technologie výroby válců. Návrh a vývoj této technologie výrazně snížil zmetkovitost a bylo dosaženo :
 - 1. jednoduchá konstrukce zařízení, které bylo vyrobeno v podmínkách katedry materiálů a strojírenské metalurgie a plně vyhovuje navržené technologii. Nedostatkem byla pouze špatná regulace otáček.
 - 2. jednoduchá kovová forma - kokila, která výrazně usnadňuje vyjímání odlitku a svou konstrukcí zvyšuje produktivitu práce.
 - 3. rychlá výroba potřebných jader ze směsi Habrinol a jejich výborné mechanické vlastnosti /pevnost/ při působení odstředivé síly a zvláště pak jejich rychlé odstranění z odlitku vlivem velice dobré rozpadovosti směsi po odli-

tí.

4. Krátký čas odlití válce, který byl 300 sekund.
5. Rychlé odstranění jádra odlitku.
6. Ovlivněná krystalizace odlitku, která vlivem rotace zamezuje vzniku povrchových a vnitřních vad odlitku zejména vznik ředin, které se nepříznivě projevují při stávající technologii gravitačního lití, snižují kvalitu a použitelnost válců.
7. Přesnost odlitku zvláště pak na funkčních plochách, která je daná použitím technologie odstředivého lití do smíšené formy.
8. Navržená technologie snižuje zmetkovitost pod 10 %, což nebylo při gravitačním lití možno dosáhnout /50% zmetkovitost/.

5.0. NÁVRH ŘÍZENÍ OTÁČEK MOTORU

V rámci řešení diplomové práce byla provedena úvaha o možnosti přesnější regulace otáček a jejich dostatečné stability. Na stávajícím zařízení se současná regulace pomocí změny napětí autotransformatorem ukázala jako neuspokojivá, protože zvolené otáčky nebylo téměř možné udržet konstantní.

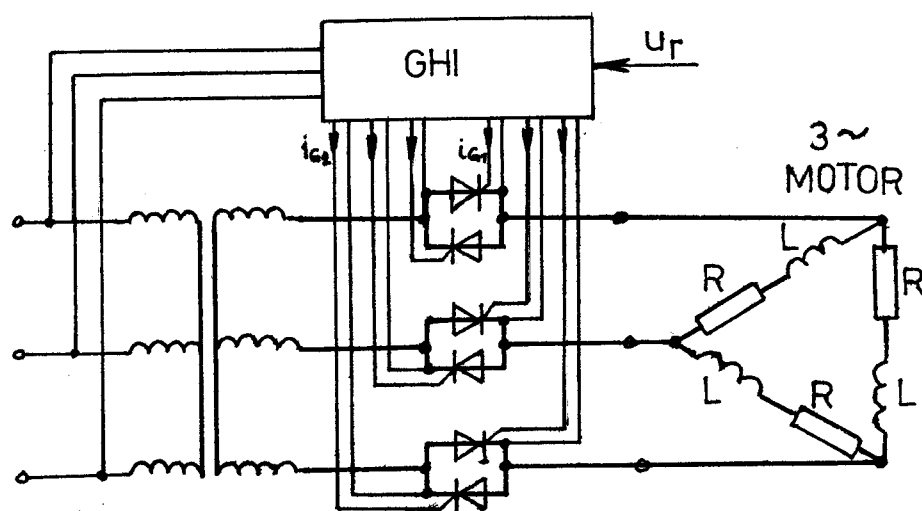
Z tohoto důvodu jsem uvažoval o použití regulace elektronické - tyristorové s impulsním řízením, pomocí trojfázového střídavého měniče napětí. Tato regulace je v současné době ve střídavých elektrických pohonech používána nejčastěji, pro svou přesnost a bezztrátový provoz.

Zjednodušený popis regulace a vlastního trojfázového střídavého měniče napětí : v každé fázi asynchronního motoru jsou zapojené dva antiparalerně řazené tyristory, které představují

polovodičový spínač pro oba dva směry střídavého proudu. Generátor hradlových impulsů /GHI/ dodává periodicky hradlové impulsy $i_{G1} - i_{G6}$ pro každý tyristor samostatně. Fázový úhel otvírání tyristorů a tedy i úhel řídicích hradlových impulsů je dán velikostí řídicího napětí u_r . Otáčky motoru je tedy možno měnit plynule v rozmezí 0 - max. pomocí změny tohoto řídicího napětí.

Schema zapojení trojfázového střídavého měniče a regulace otáček je na obr.16.

Vlastní důkladný rozbor třífázového střídavého měniče napětí je velmi složitý a zdouhavý a pro konkrétní motor je nutno navrhnout i konkrétní měnič, což jsem z časových důvodů nemohl provést. Pro další řešení této technologie odstředivého li-
tí doporučuji provést návrh a realizaci konkrétního zapojení.



Obr. 16 Schema trojfázového střídavého měniče napětí

6.0. ZÁVĚR

Předložená práce byla zpracována na téma : "Odlévání rozváděcích válců ze slitiny hliníku".

Je rozdělena na část rešeršní a část experimentální. V rešeršní části jsou popsány obecné zásady a rozbor uplatnění odlévání hliníkových slitin odstředivým způsobem jakož i slévárenské vlastnosti těchto slitin. Získané teoretické poznatky byly uplatněny v části experimentální, která je zaměřena na návrh nové technologie a vlastní výrobu rozváděcích válců. Zde byla na dříve navrženém zařízení použita a ověřena nová technologie výroby.

Úspěšným zhotovením těchto odlitků byla potvrzena i vhodnost této technologie a došlo se k těmto závěrům :

1. Navržená slitina hliníku ČSN 424515 je k této výrobě vhodná a je vhodná i pro dodatečnou povrchovou úpravu eloxováním po obrobení.
2. Kvalita vyrobených válců je velmi dobrá, odchylky od rozměrové přesnosti jsou zanedbatelné.
3. Pro výrobu rozváděcích válců na uvedeném zařízení je nutno zachovat daný technologický postup /kap.3.3/.

Na závěr byla orientačně provedena ekonomická úvaha ceny válců vyrobených v poloprovozních podmínkách KMM - VŠST, neboť vyrobená série 82 ks je zatím jako ověřovací.

Celkové náklady : 53 857.- Kčs

Přímé mzdy : 18 889.- Kčs

Režie : 180 %

Do celkových nákladů není zahrnuta cena materiálu.

S ohledem na značnou zmetkovitost /50%/ stávající výroby rozváděcích válců přináší realizace nové technologie značné finanční úspory.

Ekonomické zhodnocení je možno provést až vyrobené díly
novou navrhovanou technologií budou funkčně ověřeny v praxi.

7.0. POUŽITÁ LITERATURA

- /1/ VIGNER, M.; ZELENKA, A.; KRÁL, M.: Metodika projektování výrobních procesů. Praha 1984.
- /2/ VETIŠKA, A. a kol.: Teoretické základy slévárenské technologie. Praha 1972.
- /3/ RADĚJ, J.: Odlévání rozváděcích válců ze slitiny hliníku. /Diplomová práce/. Liberec 1987 - VŠST FS.
- /4/ FERČÁK, D.: Návrh zařízení pro odlévání rozváděcích válců. /Diplomová práce/. Liberec 1985 - VŠST FS.
- /5/ PLUHAR, J., KORITTA, J.: Strojírenské materiály. Praha 1982. 3. nezměněné vydání.
- /6/ KOLEKTIV AUTORŮ⁰ : Příručka o hliníku. Praha 1969.
- /7/ PŘIBYL, J.: Tuhnutí a nálitkování odlitků. Praha 1954. 1. vydání.
- /8/ OETTER, J.: Výkonová elektronika pre elektrické pohony. Alfa Bratislava 1988.
- /9/ ŠIROKICH, J.: Zařízení sléváren. Praha 1968. 1. vydání.

Závěrem své diplomové práce bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce s. Ing. Ivě Nové, CSc za odborné vedení a cenné rady.

Současně děkuji i s. Jaroslavu Vorlovi za jeho obětavou pomoc při mé praktické činnosti.

Dále děkuji všem, kteří radou či připomínkou pomohli při řešení diplomové práce.

pro učitel