

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Umshaus Josef

Který studuje v **magisterském studijním programu**

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

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

Přesné lití odlitků ze slitin TiAl

V anglickém jazyce:

Investment casting of TiAl alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Slitiny TiAl jsou pro svou nízkou hustotu a zajímavé vysokoteplotní vlastnosti perspektivním konstrukčním materiálem. Přesné lití odlitků ve vakuových indukčních pecích patří k nejpoužívanějším technologiím zhotovování těchto dílců u těchto slitin.

Cíle diplomové práce:

Optimalizace procesu výroby keramické skořepinové formy, tavení a lití ve vakuu.

ABSTRAKT

Intermetalické slitiny gama TiAl patří díky svým výborným mechanickým vlastnostem a nízké hustotě k perspektivním materiálům budoucnosti. Tato slitina však naráží pro širší rozšíření do praxe na obtížnost výroby a zpracování. Mezi nevýhody patří i její špatná zabíhavost. Tato práce se zabývá možnostmi zlepšování zabíhavosti slitin TiAl pomocí odstředivého odlévání se zaměřením na oběžná kola turbodmychadel. V experimentální části bylo dosaženo odlití zdravých odlitků.

Klíčová slova

Slitiny TiAl, turbínová kola turbodmychadel, přesné lití, odstředivé odlévání.

ABSTRACT

Intermetallic alloys gama TiAl are prospective materials of future thanks its excellent machanical qualities and low density. However this alloy clash with for wider expansion to the practice on burdensomeness production and processing. Among disavantages belongs to also her bad fluidity. The diploma work is angaged in possibilities imporing fluidity alloys TiAl by the help of centrifuge casting. Casting healthy casts was achieved in experimental part.

Key words

TiAl intermetallics, turbine wheel of turbocharger, investment casting, centrifugal casting.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

UMSHAUS, J. *Přesné lití odlitků ze slitin TiAl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Přesné lití odlitků ze slitin TiAl vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 18. května 2008

.....
Josef Umshaus

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Zemčíkovi, CSc. za cenné připomínky, rady a ochotnou pomoc týkající se zpracování mé diplomové práce. Děkuji také firmě LAC s.r.o. a Elektro-Mechanika Vyškov za pomoc při výrobě součástek, potřebných pro praktickou část a své rodině za podporu a pomoc při mém studiu.

OBSAH

Abstrakt.....	2
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Obsah.....	5
1 Úvod.....	7
2 Specifikace a cíl diplomové práce.....	8
3 Teoretická část.....	9
3.1 Titan.....	9
3.1.1 Technicky čistý titan	9
3.1.2 Slitiny titanu.....	9
3.1.2.1 Slitiny alfa.....	10
3.1.2.2 Slitiny beta.....	10
3.1.2.3 Slitiny alfa + beta	10
3.1.3 Žáropevné slitiny titanu	10
3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti gama TiAl [8].....	12
3.3 Použití intermetalické slitiny gama TiAl.....	13
3.3.1 Oběžné kolo turbodmychadla z gama TiAl	13
3.3.1.1 Testování TiAl turbodmychadla.....	14
3.3.1.2 Test schopnosti odezvy	15
3.3.1.3 Testování otáčení za tepla	15
3.3.1.4 Motorová zkouška na únavu	15
3.3.2 TiAl výfukové ventily.....	16
3.3.2.1 Hodnocení trvanlivosti ventilů.....	17
3.3.3 Lopatky nízkotlakých stupňů spalovacích turbín.....	18
3.4 Možnosti výroby intermetalických součástí gama TiAl	19
3.4.1 Výrobní technologie.....	19
3.4.1.1 Technologie tváření.....	20
3.4.1.2 Technologie práškové metalurgie.....	20
3.4.1.3 Technologie odlévání	20
3.5 Výroba součástí slitin gama TiAl pomocí slévárenské technologie	21
3.5.1 Tavení slitin titanu.....	21
3.5.1.1 Přetavování obloukem ve vakuu.....	21
3.5.1.2 Tavení elektronovým paprskem.....	22
3.5.1.3 Obloukové tavení plazmou	23
3.5.1.4 Indukční tavení ve studeném kelímku	24
3.5.1.5 Vakuové indukční tavení v keramických kelímcích.....	24
3.5.2 Odlévání slitin titanu	25
3.5.2.1 Gravitační odlévání	25
3.5.2.2 Antigravitační nízkotlakové vakuové odlévání.....	26
3.5.2.3 LEVICAST proces	27
3.5.2.4 Sklopné lití.....	28
3.5.2.5 Odstředivé odlévání	28
3.5.3 Numerické simulace odlévání slitin gama TiAl	32
3.5.3.1 Program ProCAST	32
3.5.3.2 Software FLOW/3D	33

3.5.4	Formy pro slitiny titanu.....	34
3.5.4.1	Trvalé formy	34
3.5.4.2	Zhutněná grafitová forma.....	34
3.5.4.3	Oxidické formy	35
3.6	Další směr vývoje slitin gama TiAl.....	35
4	Experimentální část.....	36
4.1	Cíl experimentu	36
4.2	Tavicí agregát.....	37
4.3	Návrh odstředivky	38
4.4	Spouštění odtředivky	42
4.5	Testování bez rotace	43
4.6	Testování za rotace	46
4.7	Oběžné kolo turbodmychadla o Φ 115 mm.....	48
4.7.1	Nastavení odstředivky pro odlévání	48
4.7.2	Použitá slitina.....	49
4.7.3	Použitá skořepina	49
4.7.4	Tavení.....	50
4.7.5	Odlévání	51
4.7.6	Odlitek.....	51
4.8	Oběžné kolo turbodmychadla o Φ 55 mm.....	53
4.8.1	Nastavení odstředivky pro odlévání	53
4.8.2	Použitá slitina.....	53
4.8.3	Použitá skořepina	53
4.8.4	Tavení a odlévání	54
4.8.5	Odlitek.....	54
	Závěr	56
	Seznam použitých zdrojů	57
	Seznam použitých zkratk	59
	Seznam příloh	60

1 ÚVOD

Slitiny TiAl jsou pro svou nízkou hustotu a zajímavé vysokoteplotní vlastnosti perspektivním konstrukčním materiálem. K nejpoužívanějším technologiím zhotovování dílců z těchto slitin patří přesné lití odlitků ve vakuových indukčních pecích.

Problémem výroby odlitků z těchto slitin slévárenskou technologií je však jejich špatná zabíhavost. Tato skutečnost komplikuje jednoduchost výroby a zvyšuje ekonomické náklady výroby, což snižuje konkurenceschopnost odlitků na trhu.

Zvládnutí této problematiky výroby zdravých odlitků je velmi důležité, a proto jsou v poslední době vyvíjeny nové moderní technologie a způsoby výroby odlitků.

Jako řešení těchto slévárenských nedostatků se nabízí zvyšování přehřátí taveniny, vyšší předehřívací teploty skořepinové formy a působení zvýšených vnějších sil na tekutý kov.

V této práci jsou popsány hlavní technologie výroby součástí ze slitiny gama TiAl, především se zaměřením na slévárenskou technologii a použití těchto součástí v praxi.

2 SPECIFIKACE A CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem mé diplomové práce je návrh, sestavení a zprovoznění mechanismu pro odstředivé odlévání ve vakuové indukční peci. A dále praktické odlévání intermetalické slitiny gama TiAl s posouzením vlivu odstředivé síly na zabíhavost slitiny u odlitku turbínového kola turbodmychadla, odlévaného do skořepinové formy.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Titan

Titan je pokládán za kov budoucnosti. Objevil ho W.Gregor, je pojmenován podle mýtických Titánů, patří k deseti nejrozšířenějším prvkům na zemi. Je kovatelný a tažný, lze jej dobře válcovat i na tenké fólie, je velmi odolný proti korozi, proto se používá ve strojírenství. Užívají se především jeho slitiny s vanadem a hliníkem. Slitiny s hořčíkem a hliníkem odolávají teplotě až do 600 stupňů na krátký čas i 800 stupňů, titan odolává i nízkým teplotám [1].

Vývoj slitin titanu byl vyvolán a usměrňován v převážné míře požadavky konstruktérů leteckých motorů. Praktické využití započalo rokem 1948, kdy byly v USA vyrobeny první 2 tuny [2]. V bývalém SSSR se začal titan vyrábět od roku 1950. Surovinou je oxid titaničitý z minerálů rutilu nebo ilmenitu, který je upraven na chlorid titaničitý, a ten pak redukován hořčíkem na kovový titan.

Titan má podobné mechanické vlastnosti jako oceli, jeho hustota je však podstatně menší – 4505 kg/m^3 [3]. Dá se zpracovat za tepla při střední teplotě $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Svařuje se elektrickým obloukem i bodově elektrickým odporem. Obrobitelnost není příliš dobrá. Zpracovává se na výkovky, vývalky, plechy, dráty a odlitky. Titan je kov nemagnetický. Jeho pevnost rychle klesá se vzrůstající teplotou. Naproti tomu je odolný proti korozi a významné je i jeho konstrukční použití i za teplot pod bodem mrazu. Odolává všem anorganickým i organickým kyselinám a zředěným alkalickým roztokům. Dále je důležitým legujícím prvkem ocelí.

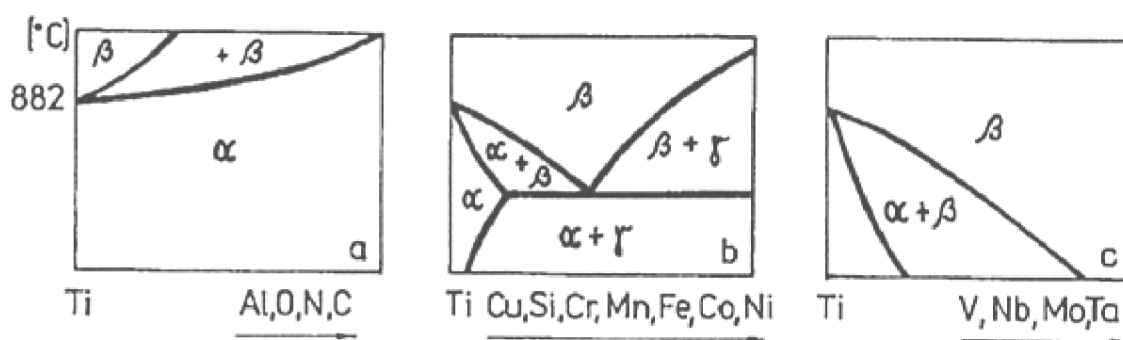
Praktické použití Ti a jeho slitin je v rozsahu od sportovního vybavení ke kosmickému prostoru, výroby elektrické energie a strojírenství, chemickému průmyslu, automobilovému, námořnímu průmyslu a medicínské technice [4].

3.1.1 Technicky čistý titan

Titan technické čistoty má pevnost v tahu R_m až 250 MPa a tažnost A_5 až 60%. Příměsí pevnost zvyšují až na 550 MPa, tažnost však současně klesá až na 20%. Nejvyšší teplota je pro dlouhodobé použití silově zatíženého titanu asi $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [2].

3.1.2 Slitiny titanu

Titan má dvě alotropické modifikace. $Ti \alpha$, s těsně uspořádanou mřížkou šesterečnou, stabilní do $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$. A $Ti \beta$ s prostorově středěnou mřížkou krychlovou, stabilní od $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$ do teploty tání $1668 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$. [2] Na stabilitu jednotlivých modifikací mají vliv i přísadové prvky (**obr.1**).



Obr.1: Vliv přísadových a příměrových prvků na teplotu polymorfní přeměny ve slitinách titanu [2]

3.1.2.1 Slitiny alfa

Slitiny alfa patří mezi slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Mají žárupevnost do 300 °C.

3.1.2.2 Slitiny beta

Hlavní předností slitin beta je vysoká odolnost proti korozi a velmi dobrá svařitelnost za pokojové teploty. Pevnost po vytvrzení je až 1400 MPa.

3.1.2.3 Slitiny alfa + beta

Slitiny alfa + beta kombinují svoje vlastnosti. Jsou tvořeny rovnoosými zrny nebo lamelami obou tuhých roztoků. Nejvíce používanou slitinou je Ti-6Al-4V. Slitiny dosahují pevnosti až 1125 MPa. Mají dobrou svařitelnost, odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit.

3.1.3 Žáropevné slitiny titanu

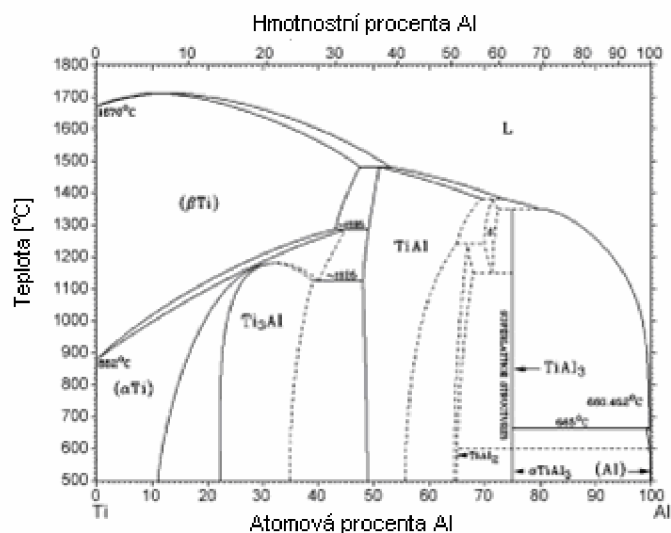
Titan představuje svými vlastnostmi velmi perspektivní prvek pro technické průmyslové využití. Proto se jím a jeho slitinami nahrazují současné tradiční materiály.

Největší uplatnění nacházejí slitiny při použití v automobilovém a leteckém průmyslu, kde se využívá jejich nízké hustoty a vysoké pevnosti. Jedná se o aplikace, kde cílené snižování hmotnosti součástek, např. ventilů, vede přímo ke zvyšování výkonu spalovacích motorů, k nepřímému zlepšení jízdního chování snižováním hmotnosti určitých součástek a tam, kde slitiny titanu vykazují nadřazenost nad tradičními současnými materiály [5].

Podmínkou pro použití těchto materiálů je však i jejich zvýšená žárupevnost, která je u čistého titanu nedostatečná. Proto byly vyvinuty žáropevné slitiny titanu, kdy základ tvoří intermetalické sloučeniny, aluminidy titanu Ti_3Al a $TiAl$ (**obr.2**). Oba aluminidy mají žárupevnost srovnatelnou se

slitinami niklu, jsou však 2,5 lehčí [2]. Mohou být použity jako součástky až do teploty 900 °C. Jejich nedostatkem je ale malá tažnost za teplot do 600 °C.

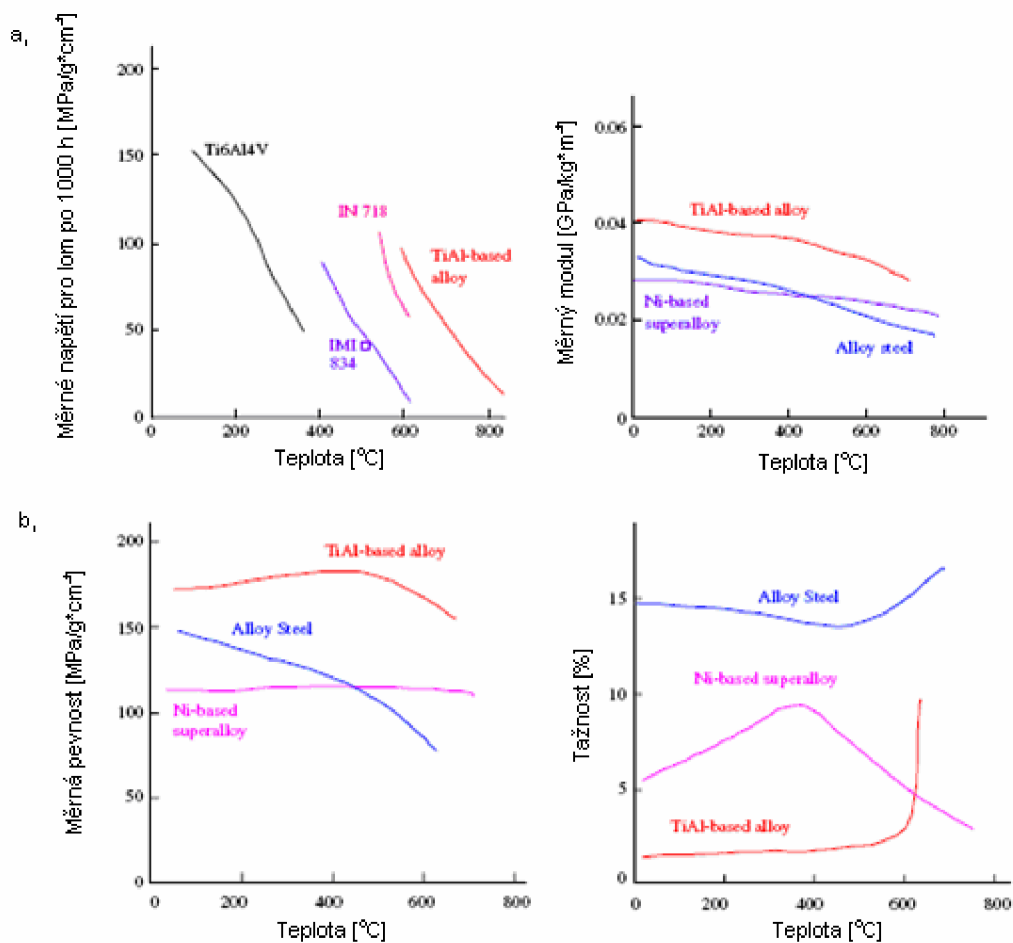
Pro zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností jsou slitiny ještě dolegovávány dalšími přísadovými prvky, jako je např. Cr, Nb a Si. Legury Nb a Si napomáhají zvyšovat odolnost proti oxidaci. Si navíc účinně zvyšuje mez tečení. Cr je přidávám pro zlepšení tažnosti [6].



Obr.2: Binární diagram Ti-Al [7]

3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti gama TiAl [8]

Teplota tavení	1460	°C
Hustota	3,9-4,2	g/cm ³
Mez pevnosti	400-1250	MPa
Tažnost	0,3-4	%
Modul pružnosti	155-180	GPa
Lomová houževnatost	12–50	MPa/m
Tepelná vodivost	11–13 * 10 ⁻⁶	K ⁻¹
Mez únavy	>550	MPa



Obr.3: Diagramy závislostí na teplotě:
 a, měrné napětí pro lom po 1000h a měrnému modulu
 b, měrné pevnosti a tažnosti
 pro legovanou ocel, Ni-slitinu a Ti-Al slitinu [7]

3.3 Použití intermetalické slitiny gama TiAl

Vývoj slitin na bázi intermetalické sloučeniny gama-TiAl byl zahájen začátkem sedmdesátých let dvacátého století. Vývoj se i dnes ubírá směrem k použití u vysokoteplotních aplikací, převážně pro spalovací turbíny, u kterých snižování hmotnosti přispívá ke zlepšení pracovních charakteristik a zvýšení účinnosti [9].

V Evropě byl zájem firmy Rolls Royce o vývoj výroby odlitků pro stator kompresoru a lopatky nízkotlakých stupňů spalovacích turbín leteckých motorů. Úspěchu dosáhla v celé řadě vývoje odlévání lehčeného odlitku z TiAl také firma Mitsubishi výrobou odlitků turbínového kola turbodmychadla. Dalším automobilovým vývojem je odlévání výfukových ventilů, které umožňuje nárůst výkonu nad ventily z nerez ocele díky 8% navýšením dovolených otáček [10].

Gama TiAl slitiny jsou nejslibnějším alternativním lehkým žáruvzdorným materiálem místo žáruvzdorné oceli a vysoce legovaných slitin [6]. K nejdůležitějším mechanickým, fyzikálním a chemickým vlastnostem, které činí titanová intermetalika takto perspektivními materiály, bezesporu patří jejich vysoká mez pevnosti, nízká hustota a velmi dobrá odolnost vůči plastické deformaci za zvýšených a vysokých teplot [11].

Tyto intermetalické sloučeniny v současnosti nacházejí svoje největší uplatnění jako součástky s rotačním, popřípadě vratným pohybem a jsou dnes vyráběny jako lopatky nízkotlakých stupňů stacionárních a leteckých spalovacích turbín a dále jako výfukové ventily a jako turbínová kola turbodmychadel na výfukové plyny spalovacích motorů.

3.3.1 Oběžné kolo turbodmychadla z gama TiAl

Turbodmychadlo je zařízení, ve kterém se otáčí tepelnou energií výfukových plynů spalovacích motorů turbína spolu s kompresorem na stejné ose. To má za následek, že přívod vzduchu potřebného pro spalování je do motoru přiváděn pod tlakem a tím se zlepšuje strojní účinek spalování. Vývoj nových materiálů na turbínová kola turbodmychadla je tedy prováděn proto, aby se dosažením zvýšeného spalovacího efektu docílilo prioritně lepších jízdních vlastností, především akcelerace a zvýšila se rychlost reakce turbíny na změnu za provozu, tzv. odezvová schopnost, a sekundárním důvodem je i přínos ve snižování znečišťujících pevných emisí ze spalované směsi.

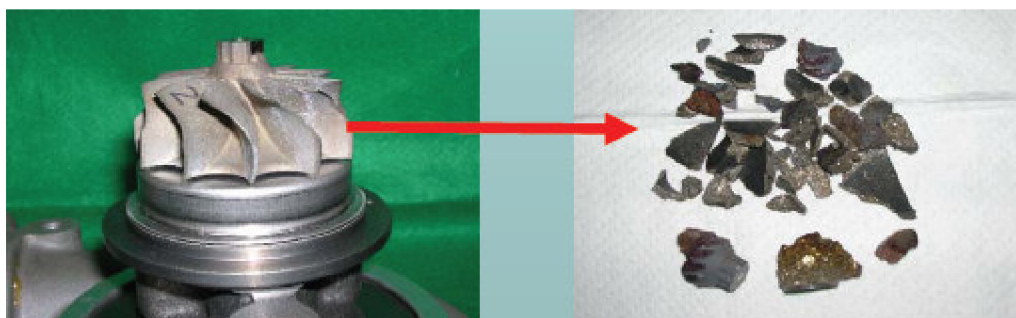
Nejjednodušším způsobem jak zlepšit odezvu těchto rotačních součástí je cílené snižování jejich hmotnosti. Vývoj nového materiálu byl porovnáván

s ohledem na běžně používaná turbínová kola z Ni vysoce legovaných slitin (Inconel 713C). Tyto materiály mají svoji hustotu asi 8000 kg/m^3 [6].

Turbíny jsou za provozu vystavovány vysokým teplotám spalin, pohybujícím se výše jak $850 \text{ }^\circ\text{C}$, proto je odolnost materiálu proti žáru jedním ze základních požadavků. Tradiční lehké materiály jako je Al nebo Ti nemohou být použity. Jako řešení se nabízí i možnost použití lehkých a žáruvzdorných součástek z keramiky. Jejich uplatnění je ale omezeno vysokými pořizovacími výdaji a omezenou tvarovou optimalizací. Nejslibnějším řešením je kombinace Ti a Al za vzniku vysoce účinné intermetalické slitiny TiAl, která byla vyvinuta spolu s různými výrobními technologiemi. Slitina byla použita jako nové dynamické oběžné kolo turbodmychadla na výfukové plyny (**obr.5**). V současnosti se nově vyvinutá turbodmychadla s TiAl turbínami úspěšně užívají pro sériové automobily Lancer od Mitsubishi Motor Corporation a jsou vyráběny technologií zpracování Levicast [12].

3.3.1.1 Testování TiAl turbodmychadla

Prvořadou vlastností materiálu turbínového kola je odolnost proti odstředivé síle vzniklé během rotace. Odstředivá síla je úměrná hustotě. V průběhu testování se prokázalo, že nově vyvinutá TiAl slitina překonává Inconel 713C přes teplotu $900 \text{ }^\circ\text{C}$. To ukazuje, že nově vyvinuté TiAl oběžné kolo turbíny může být použito jako náhrada za Inconel 713C pod aktuálními provozními stavy bez nebezpečí praskání točivým napětím. Vyšší mez pevnosti je způsobena přidáním obsahu Nb, stejně jako precipitační vytvrzení díky stopovým prvkům. Další požadovaná vlastnost pro praktické použití je odolnost proti oxidaci, i zde bylo potvrzeno, že TiAl má vyšší odolnost než Inconel 713C [5].



Obr.4: Testování oběžného kola turbodmychadla na odstředivou sílu do lomu:
a) zkušební těleso b) po destrukci [13]

Testování ukázalo další výhodu kovového materiálu, tedy rozlomení součástky na velké množství drobných kousků, což je výhodné z hlediska bezpečnosti při havárii (**obr.4**) [13].

3.3.1.2 Test schopnosti odezvy

Akcelerační odezvoový test byl uskutečněn měřením plnicího času z otáček při chodu na prázdno, tedy z 34 000 na 100 000 a 170 000 otáček jmenovité rychlosti této turbíny turbodmychadla. Turbína z TiAl ukázala 16% rychlejší zkrácení času z otáček na prázdno k otáčkám na 100 000 a o 26% rychlejší náběh na otáčky z chodu na prázdno na 170 000 než Inconel 713C [6]. Také maximální rychlosti TiAl turbínového kola turbodmychadla dosáhla 180 000 otáček, což je o 10 000 otáček více než u turbodmychadla s turbínou z Inconel 713C. V důsledku oddělení testu otáček destrukce obou turbín z TiAl a Inconel 713C překonaly 210 000 otáček, 124 % jmenovitých otáček. Výhody použití turbodmychadla s turbínovým kolem ze slitiny gama TiAl byly potvrzeny díky své nízké hmotnosti oběžného kola.

Srovnávání odezvoové schopnosti nově vyvinuté TiAl turbíny turbodmychadla a turbínového kola z Inconelu 713C v aktuálním použití tedy ukazuje, že oběžná kola z TiAl pro turbodmychadlo dosáhlo 0,2 s zlepšení času na dosažení požadovaného plnicího tlaku (50kPa) [5]. Tohoto 0,2 s rozdílu si řidič velmi rychle povšimne, vlastním pocítěním zlepšeného zrychlení vozidla. Podle toho bylo potvrzeno, že cíle rozvojového projektu, to je zlepšení odezvy turbodmychadla pomocí použití TiAl pro turbínová kola, bylo dosaženo.

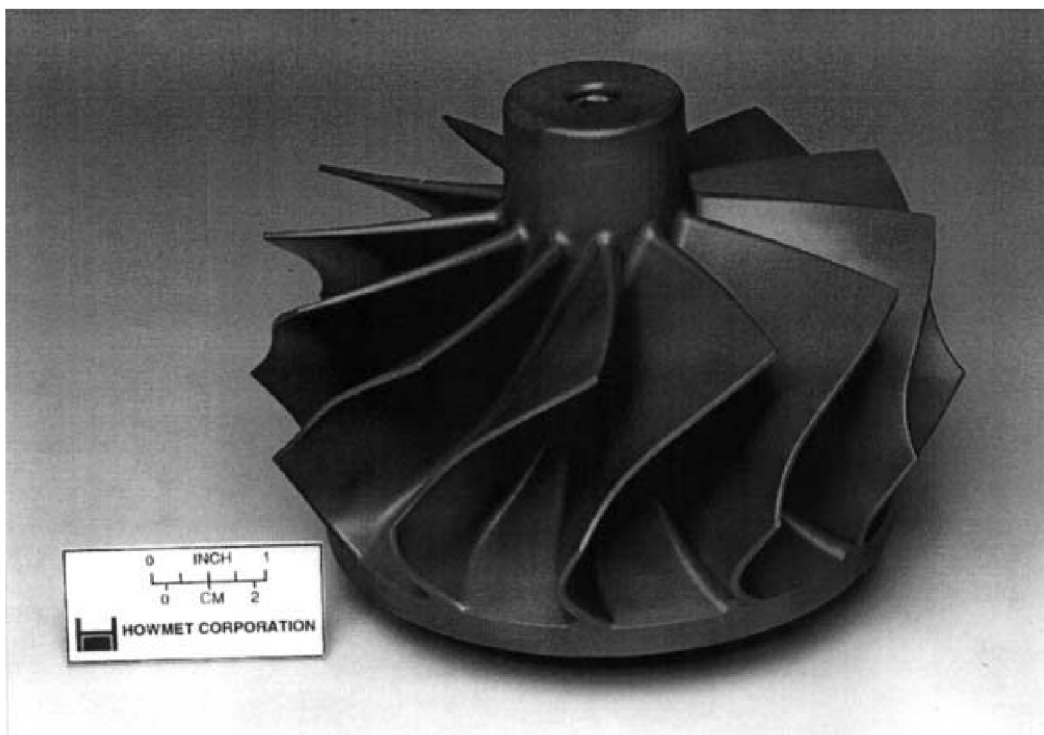
3.3.1.3 Testování otáčení za tepla

Materiály používané pro srovnání jsou Inconel 713C, nejpoužívanější pro turbínová kola turbodmychadel a MAR-M247, speciální materiál používaný na turbínová kola pro turbodmychadla závodních vozů. Z testů bylo zjištěno, že turbínová kola z TiAl umožňují použití při vyšších otáčkách bez nebezpečí prasknutí. Další výhodou je navíc vysoká odezvoová schopnost, tedy schopnost reakce a přizpůsobení se turbínového kola změnám za provozu [5].

3.3.1.4 Motorová zkouška na únavu

K tomu, aby se vyhodnotila výdrž ve skutečných podmínkách používání, byly vytvořeny vhodné benzinové motory a turbodmychadla s TiAl turbínovými koly, která byla podrobena zkoušce únavy. Zkušební podmínky se skládaly z dvojitého spojitého zatížení akcelerace/zpomalování při teplotách 900 °C a více. Tyto zkušební podmínky byly horší než možné jízdní vlastnosti. Žádné problémy jako tvarové přetvoření nebo ostré defekty nebyly nalezeny, ačkoliv povrch změnil barvu do běla, toto je vyrozuměno jako výsledek usazenin z motoru. Analýzou byly zjištěny obsahy Ca, Zn, P, Fe a O. Z toho Ca, Zn a P byly přítomny jako přísady z paliva a mazacích olejů motoru a výskyt Fe je přičítán korozi válce. Oxidační vrstva pod soudržnou

vrstvou je extrémně tenká, což ukazuje, že nastalo jen velmi malé oxidování. Existující tloušťka je rovna asi jedné pětině oxidační vrstvy vytvořené při atmosferické oxidaci, to ukázalo, že náchylnost k oxidaci při probíhající operaci není tak velká, jak bylo očekáváno. Přesný důvod je nejasný, aktuálně se uvažuje, že funkci může tvořit jeden nebo více prvků Ca, Zn, P a Fe ke zpevnění husté Al_2O_3 vrstvy a tím zlepšovat oxidační chování TiAl.



Obr.5: Odlitek turbíny z gama TiAl pro automobilové turbodmychadlo [10]

3.3.2 TiAl výfukové ventily

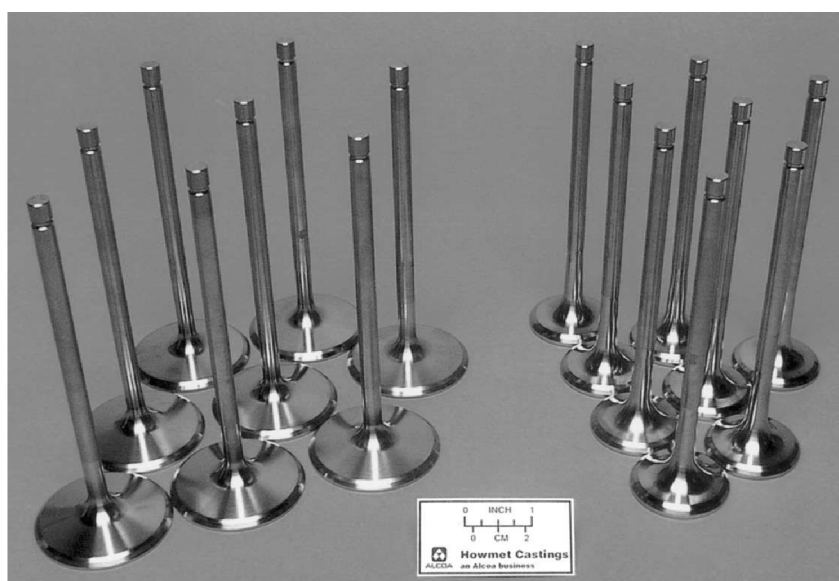
Pro zvyšování výstupního výkonu a snížení spotřeby paliva u spalovacích automobilových motorů je nezbytné zvyšovat otáčky a snižovat ztráty třením. K takovému zdokonalení vlastností motorů je tedy třeba snížit hmotnost ventilů a upravit režim spalování automobilového motoru, doprovázeného vyšší teplotou výfukových plynů. Tohoto cíle je možné dosáhnout použitím TiAl ventilů (**obr.6**). Dalším řešením byla i možnost použití nitrido-křemíkových ventilů [14]. Použití TiAl ventilů potvrdilo zlepšení výkonu i trvanlivosti při použití na výfukových ventilech při testování na testovaném motoru. Slitina ventilů byla označena jako RNT004 a byla odlita antigravitačním nízkotlakým vakuovým odléváním (Chandley low-pressure process for vacuum melting – dále jen CLV) s následným izostatickým lisováním za vysokých teplot (Hot isostatic pressing – dále jen HIP) pro

odstranění vnitřních dutin. Pro ochranu stopky a vrcholu byly ventily upraveny povrchovou karbonizací [5].

Usiluje se o výrobu TiAl ventilů, které mohou být použity v litém stavu bez dalšího potřebného HIP zpracování. Ventily jsou vyšetřovány na primární a sekundární strukturu, segregaci, třídu a pozici dutin, mechanické vlastnosti a v neposlední řadě jsou testovány pomocí motorového zátěžového testu. Pro reprodukovatelnost je nutné dodržovat chemické složení a řídit složení s úzkou šířkou tuhnutí, aby nebyla pozorována žádná segregace. Také získaný rozptyl v mezidendritických prostorech je pak velmi malý. Staženiny byly pozorovány pouze v ose horní poloviny stopky ventilu. Ventilový talíř a spodní třetina stopky jsou bez dutin. Primární struktura ventilu je tvořena vnější rovnoosou vrstvou s následující sloupcovou krystalizací a potom rovnoosým krystalickým jádrem. Mechanické vlastnosti odlévaných automobilových ventilů překonaly požadavky pro materiál na automobilové ventily [14].

3.3.2.1 Hodnocení trvanlivosti ventilů

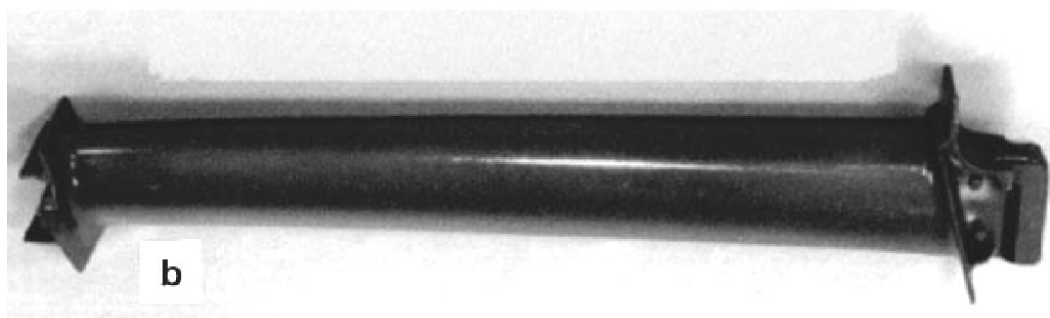
Pro hodnocení trvanlivosti ventilů se použil dynamometrový testovací motor tvořený 2,6 litrovým DOHC s dvojitým přeplňováním. Při testování byly po 150 hodinách při 6400 otáčkách ztráty kvůli obrusu a oxidaci potvrzeny jen nepatrně malé. Dokázalo se tedy, že spolehlivost RNT004 odlitých ventilů stačí na praktické použití. Zkouška výkonu byla také provedena na dalším motoru o obsahu 3,5 litru, 12 V, DOHC s přirozeným sáním. Maximální otáčky motoru byly omezeny kolem 13 000 otáček ventilovým skokem [6]. Otáčky motoru s TiAl ventily však překonaly 14 000 otáček bez jakýchkoliv ventilových skoků. Tento výsledek tedy také potvrdil výhody odlehčených TiAl ventilů pro jízdní chování.



Obr.6: Odlité výfukové ventily z gama TiAl pro vysoce výkonné automobily v USA a Evropě [10]

3.3.3 Lopatky nízkotlakých stupňů spalovacích turbín

Lopatky nízkotlakých stupňů spalovacích turbín z TiAl byly aplikovány např. do spalovací turbíny GE90 (**obr.7**). Nižší hmotnost slitiny i zde umožňuje snížit odstředivou sílu rotoru, s čímž klesá doprovodné napětí a to umožňuje použití menší velikosti disku věnce rotoru z vysoce legované slitiny [15].



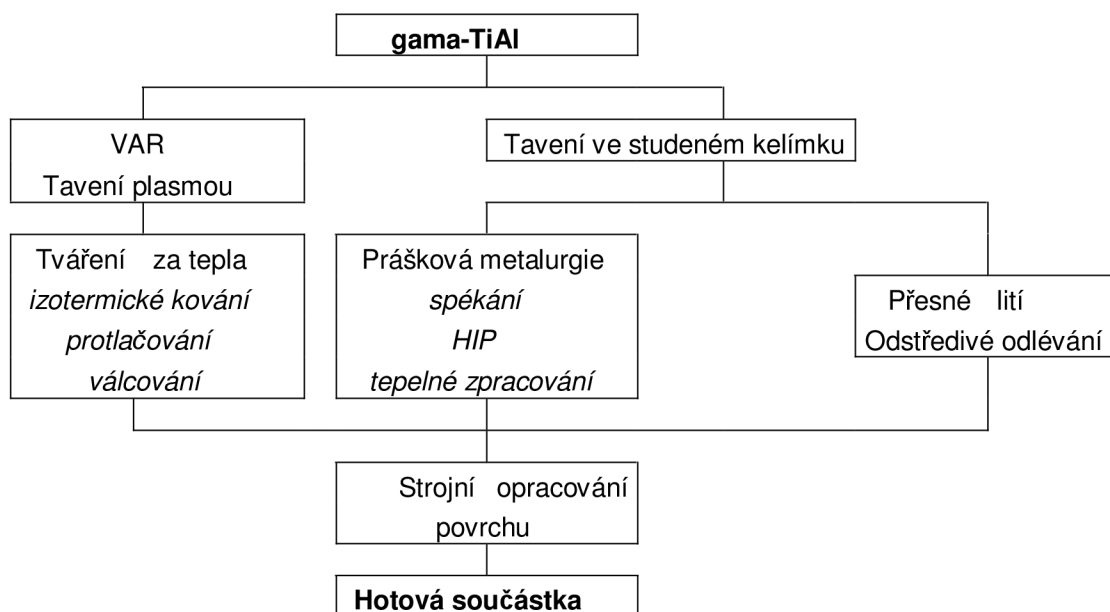
Obr.7: a) kompletní nízkotlaké oběžné kolo s odlévanými lopatkami z gama TiAl
b) odlitek nízkotlaké lopatky [15]

3.4 Možnosti výroby intermetalických součástek gama TiAl

3.4.1 Výrobní technologie

I přes všechny výhody použití tohoto materiálu za provozu, se naráží na obtížnost ve výrobě součástek. Proto jsou zkoušeny a stále vyvíjeny nové výrobní technologie a řešení výroby těchto dílců, aby byly zachovány její přednosti, dosaženo požadovaného tvaru, chemické čistoty a ekonomičnosti výroby. Pro výrobu polotovarů ze slitin titanu s hliníkem se používají tradiční metody, jako kování, prášková metalurgie a odlévání (**obr.8**). TiAl je těžké tvarovat kováním vzhledem k její inherentně nízké tažnosti a vysokým ztrátám při obrábění. Metoda práškové metalurgie je pak omezena zpracováním TiAl prášku. Největší výhody výroby TiAl součástek jsou ve výrobě slévárenským způsobem, i když i zde se naráží na stinné stránky, jako je např. nízká zabíhavost slitiny [16].

Pro možnost výroby součástek tvářecím nebo odlévacím způsobem je třeba mít zajištěné přesné požadované chemické složení slitiny. Proto jsou jako polotovary nejdříve vyráběny ingoty o chemickém složení dané slitiny. Ingoty se vyrábí několikanásobným přetavováním např. pomocí přetavování obloukem ve vakuu (Vacuum arc remelting – dále jen VAR), aby byla zajištěna homogenita slitiny [17].



Obr.8: Schéma možnosti postupu výroby součástek z gama TiAl [17]

3.4.1.1 Technologie tváření

Pro slitiny TiAl je těžké používat tradiční způsoby kování za tepla pro výrobu součástek z gama TiAl kvůli její špatné tažnosti [6]. Jedním z pokusů výroby součástek lopatek nízkotlakých stupňů spalovací turbíny je průtlačné lisování a izotermické kování. Touto možností se zabývala firma BMW Rolls Royce [10]. Lopatky, které se blížily požadovanému tvaru, uspokojily požadavky až do 700 °C. Bylo použito dvoustupňového kovacího zpracování, které poskytuje mechanickou výhodu na mikrostruktuře v příčném směru způsobené průtlačným lisováním. Po tváření muselo být finálního tvaru dosaženo obráběním a tepelným zpracováním.

Dalším pokusem tváření gama TiAl byla výroba tabulového plechu pro NASA, který měl sloužit pro použití na vozidla vzdušného prostoru. Tento vývoj byl ale zastaven kvůli příliš vysoké ceně a technologickým překážkám [10].

3.4.1.2 Technologie práškové metalurgie

Prášková metalurgie slitin titanu nabízí použitelné způsoby výroby komplexních součástek s menšími ztrátami obráběním než je u kování [4]. Nicméně použití práškové metalurgie je omezeno velikostí a tvarem. Navíc k tomu, abychom zajistili dobrý stav výrobků vytvořených práškovou metalurgií a dosáhli výrobků bez pórovitostních defektů, je požadováno izostatické lisování za vysokých teplot, což dělá práškovou metalurgii ještě dražší a tento způsob není tedy příliš ekonomický.

3.4.1.3 Technologie odlévání

Odlévání je typická tvarovací technika pro výrobu požadovaného tvaru, kdy se roztavený kov odlévá do formy. Odlévání má však i svoji stinnou stránku. Bez ohledu na druh formy se tvoří na povrchu odlitku tzv. alfa fáze, která je velmi tvrdá, obtížně obrobitelná a může vést ke vzniku trhlin a jejich šíření. A také kvůli obrovské reaktivitě kovu v roztaveném stavu. S alfa fází musí být počítáno již při počátečním návrhu součástky a následně se musí odstranit např. chemickým luhováním [4]. Také pro zajištění vnitřní zdravoti je potřeba odlitky z gama TiAl podrobit HIP zpracování. Odlitky ze slitin titanu jsou srovnatelné k tvářeným po všech stránkách a často i kvalitnější.

3.5 Výroba součástí slitin gama TiAl pomocí slévárenské technologie

Pro urychlení praktického uplatnění TiAl pro oběžná kola nízkotlakých stupňů turbín, výfukových ventilů a oběžné kola turbodmychadel je třeba vyvinout levné zpracovací technologie pro tavení, výrobu přesných forem, spojování a povrchovou úpravu. Je důležité, aby pro úspěšné natavení slitiny byly vyřešeny základní metalurgické problémy spojené s vypařováním hliníku z taveniny, s reakcemi mezi taveninou a žárovzdorninami tavicích kelímků a keramických forem, dále s reakcemi taveniny se zbytkovými plyny v komoře pece a s dezoxidací taveniny [9]. Je nutné poznávat a zlepšovat slévárenské vlastnosti slitiny, především zlepšovat špatnou zabíhavost pro dosažení požadovaného tvaru odlitku, správně řídit krystalizaci slitiny usměrněným tuhnutím a tím odstraňovat a zlepšovat vnitřní jakost odlitku, aniž by muselo být použito dalšího zpracování, jako např. HIP zpracování.

3.5.1 Tavení slitin titanu

Tavení titanu může být rozděleno podle druhu tavicího kelímku na vodou chlazené měděné tavicí kelímky a keramické tavicí kelímky. Tavicí proces titanu musí být vybrán s ohledem na složení slitiny, tvar a velikosti odlitku, ekonomiku a provozní faktory [4].

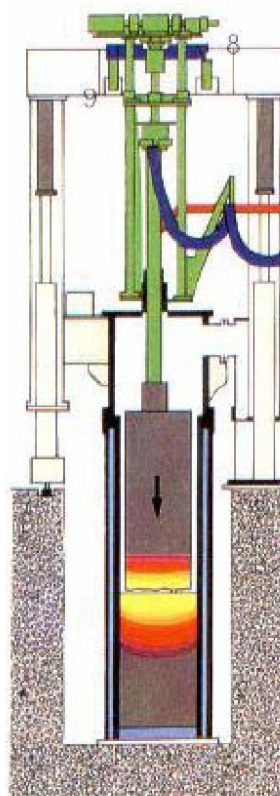
3.5.1.1 Přetavování obloukem ve vakuu

Přetavování obloukem ve vakuu (VAR) je spojitě přetavování tavné elektrody způsobené obloukem uvnitř vakuového prostředí (**obr.9**). Stejnoseměrný výkon oblouku je tvořen mezi elektrodou a základním talířem vodou chlazené měděné kokily nebo tavicího kelímku. Teplo roztavené špičky oblouku je tvořeno uvnitř vodou chlazené měděné kokily nebo tavicího kelímku. Tavení titanu metodou VAR s sebou přináší některé výhody a to v odstranění rozpouštění nežádoucích plynů, jako například vodíku a dusíku, dále minimalizaci obsahu nežádoucích stopových prvků ve vysokých tlacích par, zlepšení čistoty oddělením oxidů a dosažení usměrněného tuhnutí ingotu ode dna k vrcholu k tomu, abychom se vyhnuli makroskopickému odměšování a minimalizovalo se mikroskopické odměšování [4].

Navzdory těmto výhodám usměrněného tuhnutí se mohou v přetaveném ingotu vyskytovat různé defekty, jako například pihy, bílé tečky a póry. K tomu, aby se jim předešlo, je nezbytné řídit souvztažné provozní parametry,

jako například použití homogenní elektrody, přetavovací dávku, výšku taveniny a obloukový sloupec.

Protože je však materiál roztaven ve vodou chlazeném kelímku, je zde dostupné velmi malé přehřátí pro zlepšení slévatelnosti titanu. Proto první vstupující kov do formy je žhavější než poslední kov, což má za následek špatné tuhnutí profilu odlitku. Navíc nezbytné použití předslitiny elektrod pro VAR tavení potřebné k výrobě odlitků, dělá metodu extrémně obtížnou a drahou. Navíc odlitky musí podstoupit HIP zpracování k tomu, aby se minimalizovala vnitřní poretita. Proto použití VAR principu není vhodné pro tenké stěny a přesnost a je používám především pro výrobu ingotů a jednoduchých tvarových součástek.



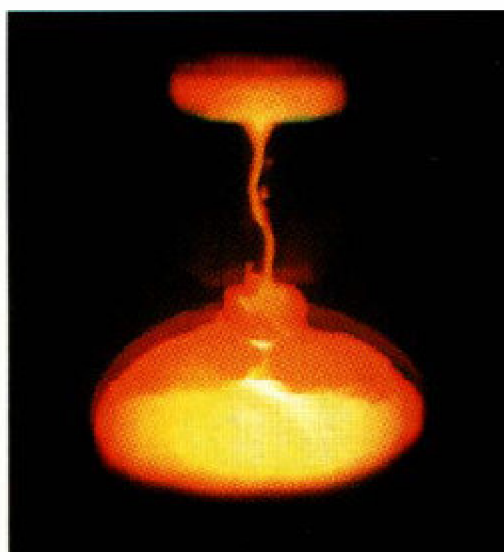
Obr.9: Schematický pracovní postup VAR [18]

3.5.1.2 Tavení elektronovým paprskem

Tavení elektronovým paprskem (Electron beam melting- dále jen EB) je použitelné pro výrobu ingotů reaktivních kovů jako je například titan, niob, tantal a vysocelegované slitiny až do hmotnosti 2,5 tuny v jedné peci (**obr.10**). K charakteristikám EB procesu patří pružnost a regulovatelnost teploty, výkonu a reakce taveniny a použití široké škály možnosti výroby materiálu pro odlitek za podmínek kvality, třídy a tvaru.

Výroba odlitků z titanu v EB pecích je ekonomická při výrobě velkého množství stejné třídy a hmotnosti, kdy může být použit rozsah složení slitiny.

EB odlévání je ekonomicky lepší než postup VAR a plazmové tavení obloukem, odpadá smísení odpadu tavné elektrody a dalšího pevného odpadu, takže EB tavením můžeme pokaždé odlévat vícekrát, protože tavicí kelímek je čistý. Další výhodou EB tavení je možnost přehřátí taveniny těsně před litím. Nicméně, většina EB tavicích procesů používá vodou chlazené tavicí kelímky, proto i u tohoto procesu musí následovat HIP zpracování, protože se zde očekává poréznost v odlitku. Ještě horší je umístění taveniny která obsahuje znatelné množství přehřátí pouze v blízkosti samotného paprsku v roztavené tavenině. Také v EB tavicím procesu je velmi obtížná kontrola základních prvků Al, Sn a Cr, protože legující prvky mají vysoký tlak par.



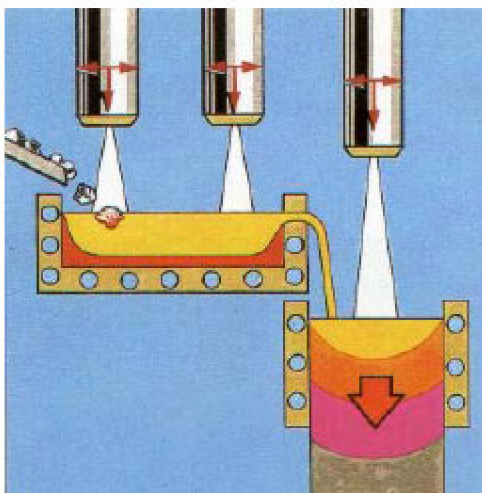
Obr.10: Schematický pracovní postup EB [18]

3.5.1.3 Obloukové tavení plazmou

Plazmové obloukové tavení (Plasma arc melting – dále jen PAM) je materiálová zpracovací technika, ve které je teplo plazmy používáno pro tavení daného materiálu (**obr.11**). Teplá plazma je považována za vhodný zdroj tepla, jestliže je vysoká teplota stanovená plynou atmosférou potřebná k tavení materiálu před následným zpracováním, jako například tuhnutím. PAM pece jsou obvykle ovládané pod mírným přetlakem k tomu, aby se zabránilo potencionálnímu znečištění atmosféry kyslíkem a dusíkem. Také vysoký tlak je základním požadavkem pro předcházení selektivního vypařování slitinových základních prvků, které se vyznačují vysokým aktivním koeficientem nebo tlakem par jako Al, Cr a Mg ve slitinách titanu. PAM odlévání je alternativní proces VAR nebo EB odlévání, překonává některé nevýhody. Nedostatkem PAM tavení odlitků slitin titanu je však špatná kontrola přehřátí, kterou nelze provést. Se vzrůstajícím napětím totiž

dosahujeme rostoucího tavicího výkonu a lokálního přehřátí namísto přehřátí celého objemu taveniny.

I tato PAM tavicí metoda používá vodou chlazené měděné tavicí kelímky, a proto není zbavena poréznosti a problému nízké zabíhavosti odlitků z titanu.



Obr.11: Schematický pracovní postup PAM [18]

3.5.1.4 Indukční tavení ve studeném kelímku

Tavicí a odlévací systém pro titan používající indukční tavení ve studeném kelímku (Induction skull melting- dále jen ISM) byl vyvinut pro minimalizování stinných stránek dalších tavicích systémů jako VAR, EB a PAM. Princip nabízí několik výhod pro odlévání titanových odlitků, zahrnující rychlý čas cyklu. Tento proces používá vodou chlazený měděný tavicí kelímek, tak se vylučuje znečištění přidružené u typických vakuových indukčních tavení s keramickým kelímkem. Indukční tavení ve studeném kelímku pro odlévání odlitků z titanu má několik výhod. Protože vsázka je roztavena prostřednictvím magnetického pole, není třeba vytvářet nějakou elektrodu. Tyto výhody dělají ISM atraktivním procesem pro výrobu různorodých, vysoce kvalitních titanových odlitků. Nicméně v ISM systému je přehřátí taveniny titanu extrémně nízké, což vede ke staženinám a plynovým bublinám, stejně jako k vadám nedolití.

3.5.1.5 Vakuové indukční tavení v keramických kelímcích

Vakuové indukční tavení (Vacuum induction melting – dále jen VIM) může být použito v mnoha aplikacích, zvláště v případě reaktivních slitin titanu a profilových součástek. Ve srovnání se studeným tavicím kelímkem principu jako VAR, EB, PAM a ISM může VIM princip zvláště řídit teplotu roztaveného

kovu. Navíc elektromagnetické pole zajišťuje pohyb taveniny a homogenitu chemického složení. Ve VIM je primárním vodičem cívka, vyrábí sekundární proudy elektromagnetickou indukcí vývin tepla uvnitř kovové vsázky. Oxidy jako Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 a CaO tavicího kelímku jsou používány pro přímé tavení železa a kovů vzácných zemin. Slitiny titanu v sobě však rozpouští velké množství kyslíku, a proto dochází k znečištění slitiny a vyššímu opotřebenému kelímku erozí. Tradiční keramické hmoty tedy nejsou pro tavení titanu vhodné, s výjimkou CaO tavicího kelímku. Tyto keramické kelímky ale musí být neustále chráněny před vlhkostí kvůli jejich silným hydrofobickým vlastnostem.

3.5.2 Odlévání slitin titanu

K odlévání taveniny titanu do dutiny formy je možno použít všechny dostupné metody s využitím gravitační nebo odstředivé síly, pomocí podtlaku nebo nízkotlakého odlévání [4]. Odlévání odlitků představuje schůdné prostředky k tomu, aby se vyráběly komplexní součástky kvůli jejich špatné zpracovatelnosti a obrobitelnosti. TiAl slitiny jsou však i obtížně odlévatelný materiál, hlavně pro vysokou reaktivnost roztaveného kovu a špatnou zabíhavost [12].

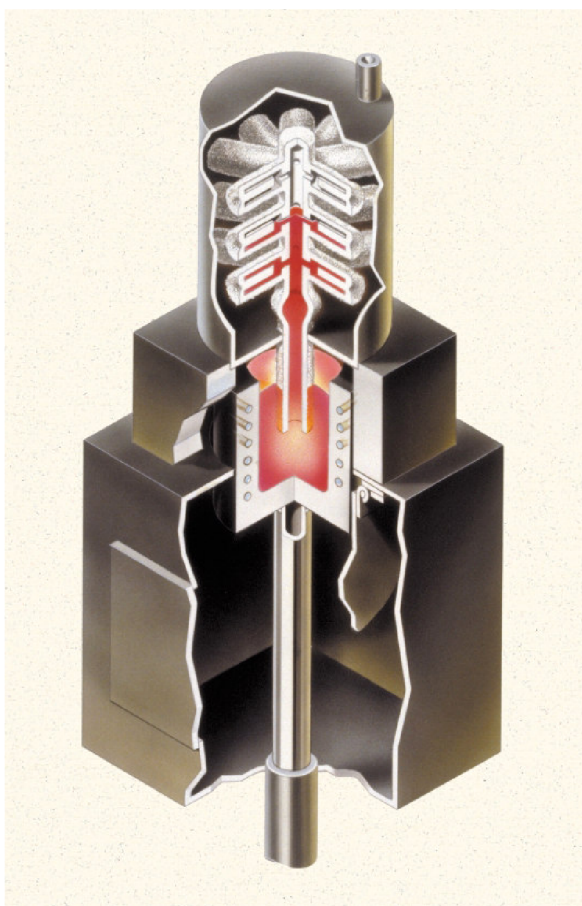
3.5.2.1 Gravitační odlévání

Gravitační odlévání titanu je nejjednodušší lící metodou bez nutnosti zvláštního vybavení. Zajištění zabíhavosti taveniny titanu do dutiny formy v případě gravitačního odlévání je velmi obtížné. Lící rychlost a přehřátí taveniny titanu nemůže být řízena ve studeném tavicím kelímku u tavicích procesů VAR, EB, PAM a ISM. Pro překonání této stinné stránky může být povoleno přehřátí u VIM s CaO kelímek. Také forma může být řízeně přehřáta na teplotu odporovou pecí. Nicméně v případě odlévání titanu jsou hlavní problémy reakce na mezifázové rozhraní, kterému se nemůžeme vyhnout ani u kovové formy. Problém se nazývá "alfa-fáze" u keramické formy a přilnavost ke kovové formě se nazývá "titanové pájení" pro trvalé formy. Tyto gravitačně odlévané odlitky titanu mají nízkou produktivitu výroby a musí být následně použito HIP zpracování pro opravu odlitku titanu svařením kontrakčních dutin a tím zajištění vnitřní zdravoti.

3.5.2.2 Antigravitační nízkotlakové vakuové odlévání

Hitchiner vyvinul antigravitační nízkotlakový vakouvý proces odlévání (CLV) v roce 1970 (**obr.12**). Tradiční gravitační lití potřebuje vhodnou vtokovou soustavu pro minimalizaci vad odlitku turbulentním tokem taveniny. Ve srovnání s normálním litím může CLV postup poskytovat větší "efektivní laminární tok kovu", umožňuje lepší plnění formy a zlepšený tvar odlitku. Navíc CLV proces nabízí menší erozi formy, nižší polapení oxidů a zlepšení kvality odlévání. CLV tavicí postup používá keramický tavicí kelímek a formu.

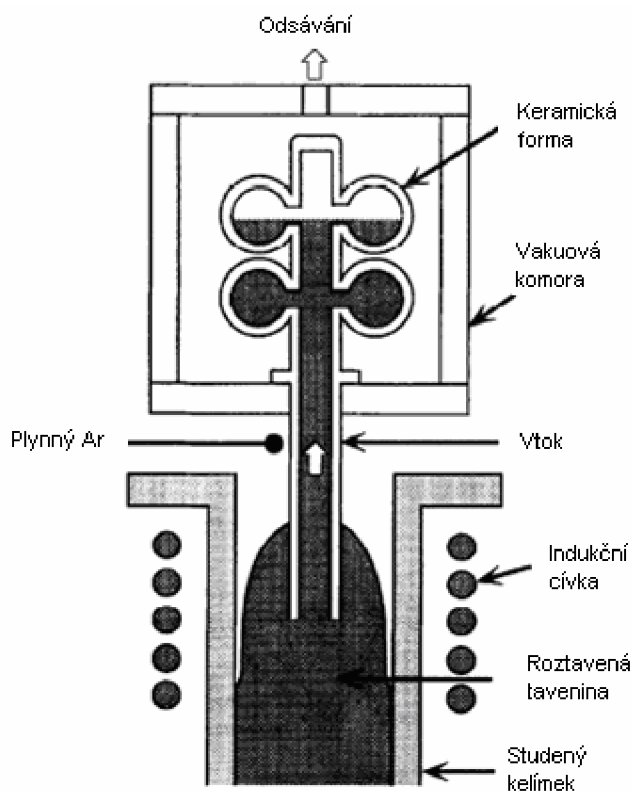
CLV princip je tedy jeden z antigravitačních nízkotlakových odlévacích způsobů lití, kde je tavenina nasávána nahoru do dutiny prodyšné keramické skořepinové formy snížením tlaku vně formy. Tento proces má ve srovnání s tradičními odlévacími způsoby, jako je gravitační lití značnou výhodu v plnění tenkých průřezů formy a snížení vady odlitku bublin [6].



Obr.12: CLV odlévací postup [19]

3.5.2.3 LEVICAST proces

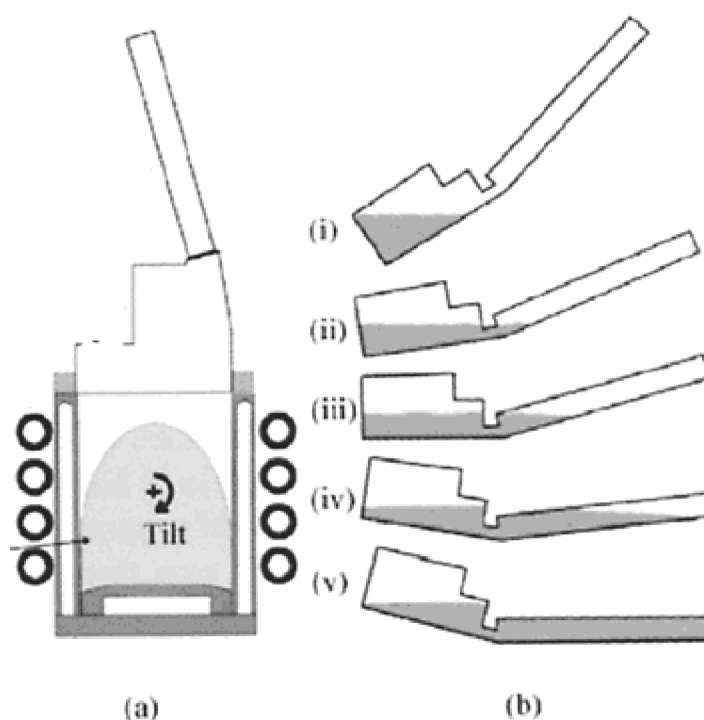
Levicast má svoji podstatu založenou na Hitchinerově CLV postupu odlévání (**obr.13**). Tento proces se skládá ze studeného tavicího kelímku s levitačním tavením a antigravitačním nízkotlakým odléváním. Tato kombinace byla do finální podoby vyvinuta v Daido Steel [6]. TiAl je natavován ve speciálně navrženém vodou chlazeném měděném kelímku v argonové atmosféře pomocí vysoké indukční frekvence. Tavenina je tedy ohraničena a odtlačována pryč od stěny tavicího kelímku elektromagnetickou silou indukovanou tavením. Přehřátí taveniny pro odlévání se tímto způsobem dostatečně zvyšuje eliminací tepelné ztráty přes stěnu tavicího kelímku. Po natavení je k odlévání použito antigravitačního nízkotlakého odlévání do keramické skořepinové formy ve vakuu nebo atmosféře inertního plynu. Tento proces je patentován, stejně jako celé zařízení tohoto principu. Proto Levicast technologie není k dispozici pro tradiční systém odlévání Ti [12].



Obr.13: Schematický obrázek procesu Levicast [7]

3.5.2.4 Sklopné lití

Přehřátá keramická forma je vtokem přiložena na upravený studený tavicí kelímek a tavenina je odlévána společným nakloněním kelímku a formy (**obr.14**). Výzkum ukázal, že nejvhodnější je počáteční úhel 15° . U formy musela být zajištěna dostatečná možnost odvodu plynu. Nový proces kombinování čistého tavení v ISM peci s klidným plněním do horké keramické skořepinové formy byl vyvinut jako možnost odlévání TiAl, které neobsahuje bubliny. Odlévání může mít sklon k nedolitku, ale tento defekt je snižován pomocí zvýšení hmotnosti taveniny.



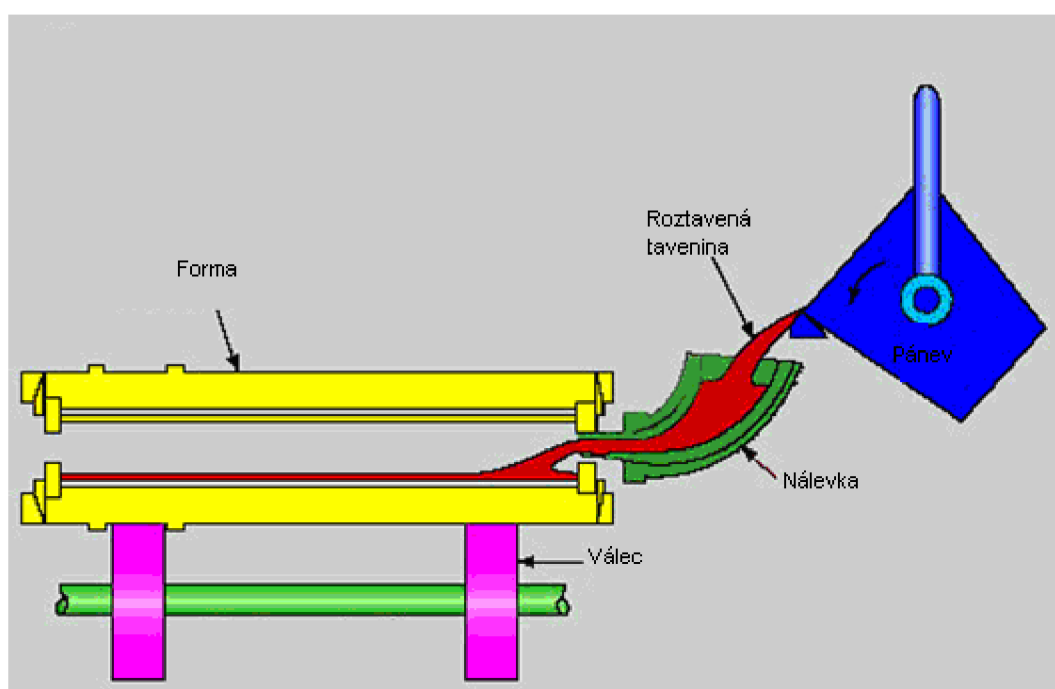
Obr.14: Schema sklopného lití s ISM tavením
a, přiložená skořepina k peci
b, časové plnění dutiny formy naklápěním [8]

3.5.2.5 Odstředivé odlévání

Charakteristickým rysem odstředivého způsobu odlévání je získání tvaru odlitku v otáčející se formě. Působící odstředivá síla ovlivňuje povrch odlitku, jeho strukturu a pevnost. Tlakem kovu na stěnu formy se dosahuje těsného kontaktu mezi kovem a formou [21]. Odstředivé odlévání umožňuje výrobu vyšší jakosti jako při gravitačním odlévání a další výhodou je lepší využití tekutého kovu, snížené náklady na mechanické opracování, vyšší přesnost

odlitku a jejich lepší mechanické vlastnosti oproti odlitkům litych gravitačně do pískových forem. Princip odstředivého odlévání spočívá v nalití taveniny do rotující formy. Při tuhnutí odlitku působí na tekutý kov odstředivá síla. Podle osy rotace odlitku rozdělujeme odstředivé odlévání na dva základní typy, a to s vertikální a horizontální osou otáčení.

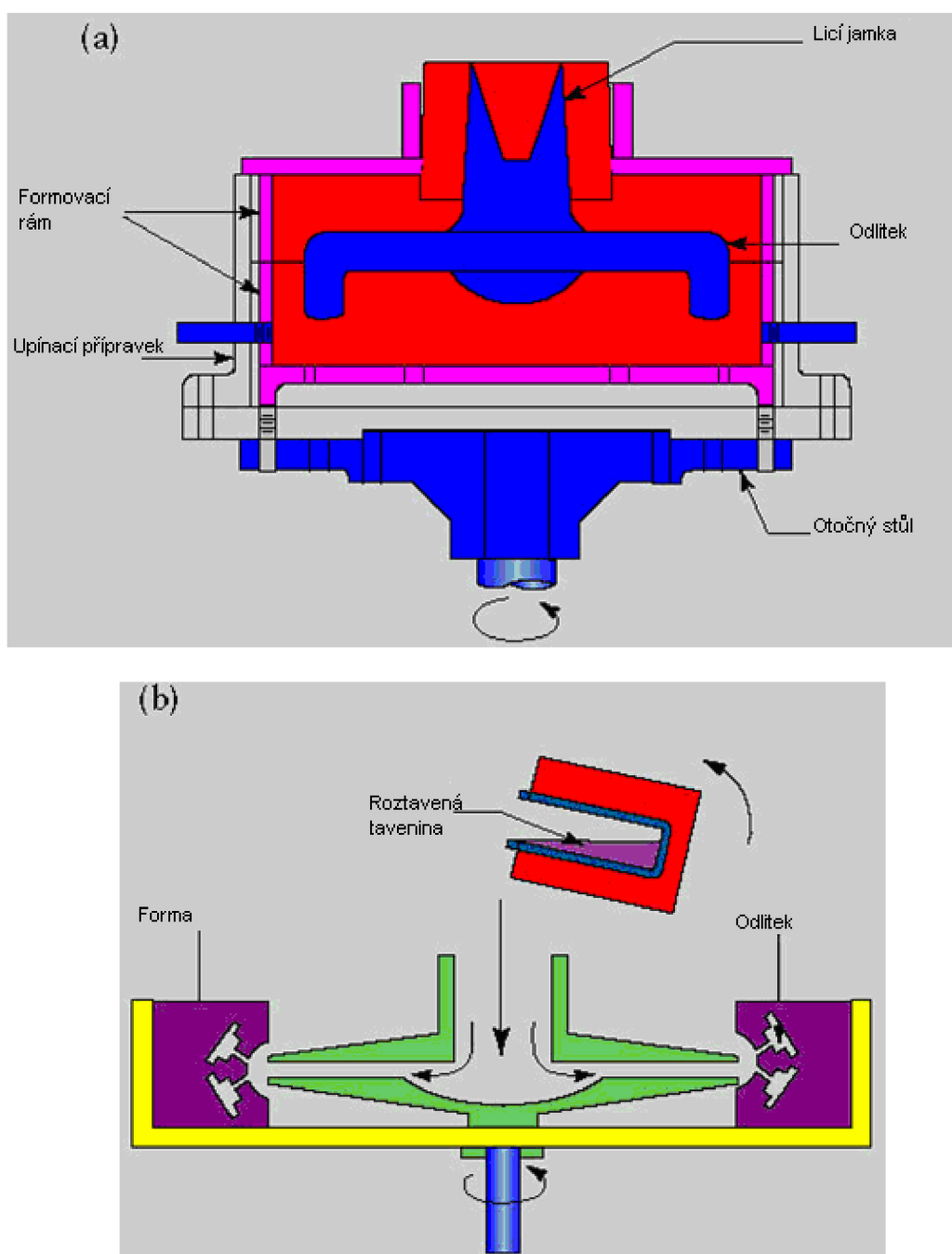
Horizontálního odstředivého odlévání se používá převážně pro odlévání dutých válcovitých odlitků (**obr.15**).



Obr.15: Schema horizontálního odstředivého odlévání [9]

Dalším rozdělením způsobu odstředivého odlévání je tzv. pravé a nepravé odstředivé odlévání (**obr.16**). U pravého odstředivého odlévání je osa odlitku totožná s osou rotace. Velikost působící odstředivé síly, která působí na kov při otáčení formy, je dána vztahem: $F=mr\omega^2$, kde m je hmotnost taveniny, r je poloměr rotující částice a ω je úhlová rychlost.

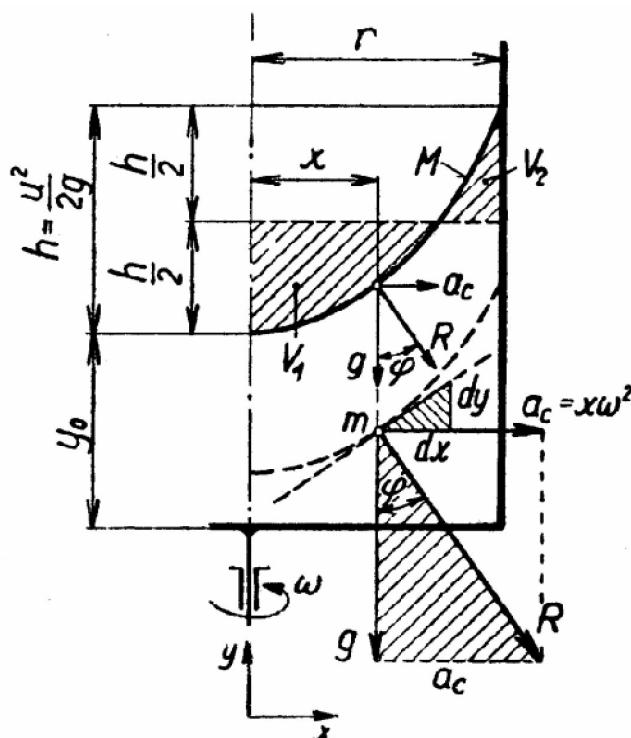
Při nepravém odstředivém odlévání se odstředivá síla nevyužívá na vytvoření povrchu, ale podporuje vyplnění a dosazování taveniny do odlitku. Osa rotace je totožná s osou vtokového kanálu.



Obr.16: Schematické zobrazení vertikálního odstředivého odlévání
a, pravé odstředivé odlévání
b, nepravé odstředivé odlévání [9]

Při odstředivém odlévání je nutno mít na paměti zákony hydromechaniky. Tavenina se po odlití do formy chová jako kapalina v rotující nádobě. Proto je třeba počítat při změně tvaru hladiny z klidu do pohybu se vznikem rotačního paraboloidu [22]. Ze zákonů hydromechaniky vyplývá, že odstředivé zrychlení je závislé na kvadrátu úhlové rychlosti a poloměru dutiny. Tedy zrychlení $a = x\omega^2$. Hladina dostává tvar rotačního paraboloidu, který je půlen hladinou v klidu a jeho výška se určí ze vztahu: $h = r^2\omega^2/2g$. Kde r je poloměr

dutiny, ω je úhlová rychlost a g je gravitační zrychlení. **Obr. 17** zobrazuje působící síly a tvar hladiny při rotaci.

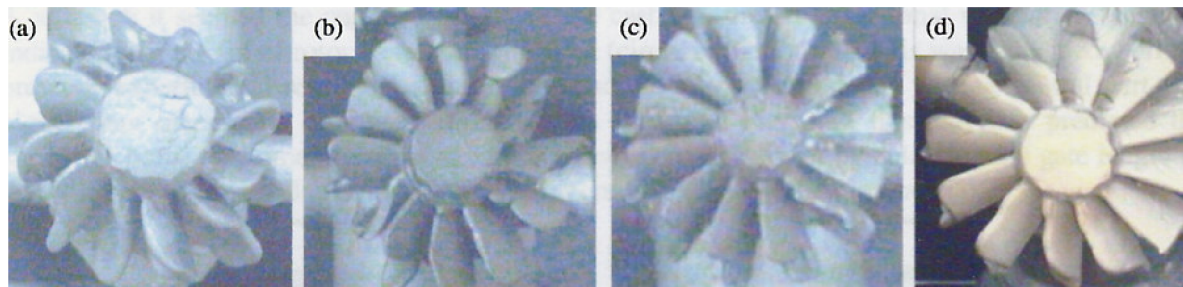


Obr.17: Tvar hladiny kapaliny v rotující nádobě [22]

Za parametry odstředivého přesného lití jsou považované tyto faktory: tvar odlitku, odstředivá síla a přehřátí taveniny. Podle experimentálních výsledků během statického odlévání, byl režim plnění odstředivou silou více účinný než pro přehřátou formu [12]. Byly provedeny pokusy odstředivého odlévání TiAl turbínového kola turbodmychadla (**obr.18**). V tomto případě odstředivého odlévání byl úhel konstrukce zářezu mezi kanálem a vtokem 90 stupňů pro případ 1 a 45 stupňů pro případ 2. Pokus byl zaměřen na určení maximální odstředivé síly potřebné pro odlévání a následně pro návrh vtokové soustavy aby bylo klidnější plnění taveniny TiAl do dutiny formy. Licí výška mezi tavicím kelímkem a zářezem skořepinové formy byla konstantní 250 mm. Byly aplikovány dvě úrovně odstředivé síly charakterizované násobky g (gravitačním zrychlením) o velikosti asi 7 a 5 m/s^2 .

Bylo použito Al_2O_3 formy vyrobené pomocí vytavitelného modelu. Odlitky byly vyráběny s následující licí charakteristikou: otáčky 150 a 300/min. Z výsledků bylo stanoveno, že je nutné najít kompromis pro velikost odstředivé síly, která napomáhá k plnění dutiny formy, ale zároveň je pro výrobu kvalitních odlitků třeba i klidného plnění taveniny, aby nevznikaly defekty jako broky rozstříknuté slitiny od stěny formy. U pokusu však bylo používáno studeného kelímku, proto nebylo možné dosáhnout dostatečného

přehřátí taveniny. I nadále je třeba snažit se o dostatečné přehřátí taveniny, ohřev formy a správné navrhnutí vtokové soustavy a odstředivé síly.



Obr.18: Fotografie odstředivě odlévaných turbínových kol turbodmychalal:
a) jmenovité otáčky 150/min b) 300/min
c) d) 300/min s vyšším přehřátím taveniny [10]

3.5.3 Numerické simulace odlévání slitin gama TiAl

Účelem numerického simulačního softwaru je lepší pochopení chování taveniny při odlévání umožňující následnou aplikaci do praxe. Hlavními cíli výsledků je zajištění zaplnění dutiny formy a tím získání přesného a konečného finálního tvaru odlitku. Dále je sledováno plnění formy a průběh teplot taveniny, které nám umožňuje vhodnější stanovení vtokové soustavy a eliminaci vnitřních defektů, studených spojů a staženin. Z používaných softwarů modelování jsou známé např. programy ProCAST nebo FLOW/3D [12,16].

3.5.3.1 Program ProCAST

Simulace pomocí sady programu ProCAST byla použita pro ukázkou plnění formy a tuhnutí odlitků výfukových ventilů z TiAl (**obr.19**). Pro popis chování taveniny při odstředivém lití byla zvolena metoda konečných prvků (Finite element method – dále jen FEM), která využívá modelu viskozity Carreau-Yasuda. Dále tvoří základ pro program ProCAST Navier-Stokesova rovnice pro Newtonovu kapalinu. Pro vyřešení problému přechodové fáze během tuhnutí je použita metoda entalpie [16]. Pro výpočet jsou zadány teplotně fyzikální vlastnosti odlévaného materiálu a formy.

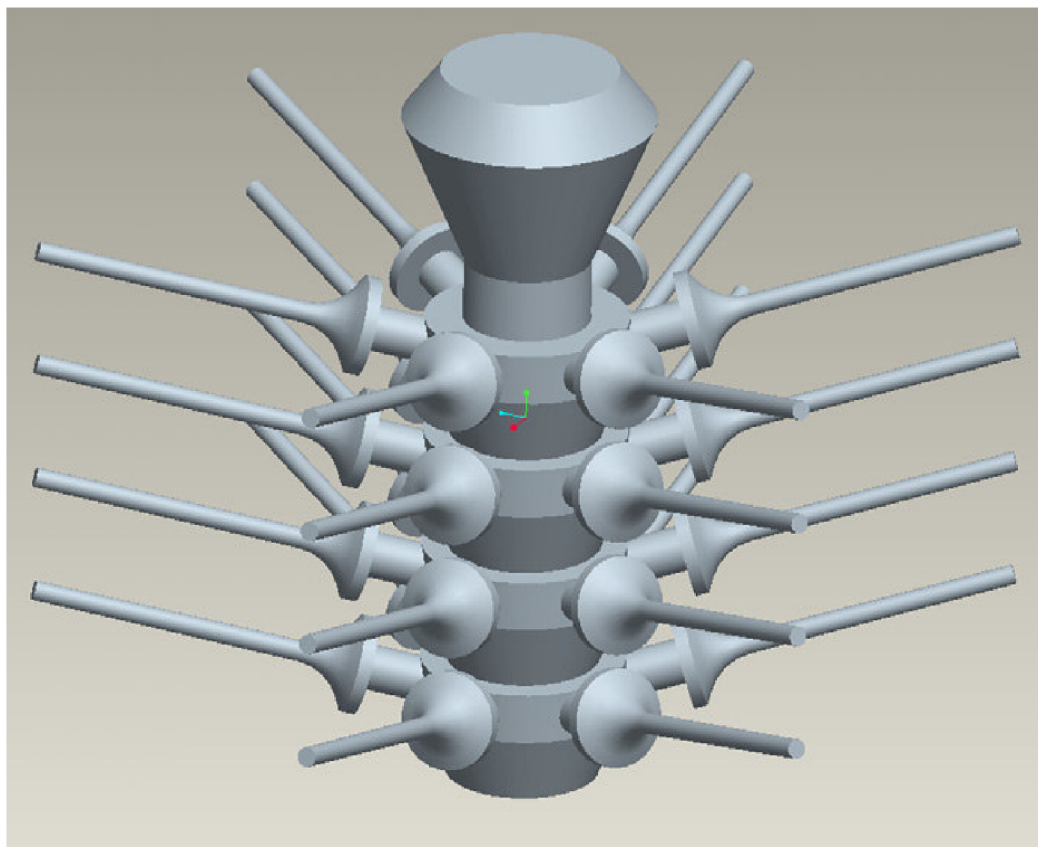
Klíčovým cílem této simulace bylo zjištění licí teploty, teploty formy a rychlosti rotace. Jako optimální odlévací parametry pro metodu odstředivého lití na vytavitelný model tvaru formy výfukového ventilu ze slitin titan-hliník bylo stanoveny tyto parametry:

Teplota lití: 1690 – 1720 °C

Teplota formy: 900 – 950 °C

Rychlost rotace: 400-450 ot/min

Ke zredukování a eliminování pórovitosti došlo u optimalizovaného modelu zvětšením vtoku a snížením vedlejších vyzařovacích vlivů s podporou následného tuhnutí.



Obr.19: 3D model rozmístění odlitků ventilů na stromečku simulovaného pomocí softwaru ProCast [11]

3.5.3.2 Software FLOW/3D

Dalším komerčním softwarem zabývajícím se chováním taveniny je FLOW/3D [12].

Program byl úspěšně použit pro simulaci plnění formy a tuhnutí při odlévání slitin TiAl (**obr.20**). FLOW/3D používá numerické řešení Navier-Stokesovy a Fourierovy rovnice pomocí metody konečných objemů (Finite volume method – dále jen FVM).



Obr.20: Průběh plnění formy v závislosti na čase a teplotě; a, 15% naplnění (0,3s)
b, 30% naplnění (0,6s)
c, 50% naplnění (0,99s) při modelování odlévání turbínového kola turbodmychadla pomocí FLOW/3D [12]

3.5.4 Formy pro slitiny titanu

Překážkou širšího použití titanu je nedostatek dokonalých formovacích hmot. Formy pro titanové odlitky musí splňovat mez pevnosti, tvařitelnost, prodyšnost a rozpadavost, stejně jako tepelnou stabilitu proti roztavenému kovu. Formovací materiály mohou být rozděleny na trvalé formy, lisované grafitové formy a oxidické formy [4].

3.5.4.1 Trvalé formy

Velké množství výzkumníků zkusilo vyrobit trvalé formy na odlitky z titanu z mědi, vysoce čistého grafitu, nástrojové ocele, tantalu a z niobu v pokusu o ekonomickou velkovýrobu poměrně jednoduchých součástí. Nicméně měď a vysoce čistý grafit nebyl vhodný k odlévání tvarových součástí, ale k výrobě ingotů. Trvalé formy potřebujeme předehřívát nebo odstředivě odlévat k tomu, aby se kompenzovala špatná zabíhavost roztaveného titanu.

3.5.4.2 Zhutněná grafitová forma

Zhutněný grafit se užívá k produkci forem pro odlévání reagujících kovů a slitin, jako např. titan. Zhutňované grafitové formy jsou vyráběny ze směsi obsahující rozptýlenou tuhu mající přesně řízenou velikost částic a rozložení. K této směsi je přidáno obyčejně 10% pryskyřice, 7% pojiva a 3% škrobu. Formovací materiál je pneumaticky pěchován kolem modelu a tvrzený ve vysokých teplotách v redukční atmosféře. Uhlíkový prvek zapříčiňuje znik alfa fáze, mající původ v intersticiálním tuhém roztoku, a defekty jako nedolití a studené spoje vznikají kvůli vysoké tepelné vodivosti tuhy.

3.5.4.3 Oxidické formy

Stinnou stránkou přesného odlévání odlitků titanu je alfa fáze, která je obtížně obrobitelná a může vést k iniciaci trhlin a jejich šíření, kvůli jejich enormní reaktivitě. Alfa fáze je obecně známá tím, že vzniká jako intersticiální roztok s uhlíkem, dusíkem a hlavně kyslíkem, rozpuštěním z formy. K tomu, aby se vyhnulo tomuto problému, byly přijaty jako formovací materiály drahé keramické látky jako ZrO_2 , $ZrSiO_4$, $CaZrO_3$, CaO a Y_2O_3 , protože jejich standardní změny volné entalpie potřebné pro tvorbu těchto oxidů jsou více negativní než TiO_2 . Bez ohledu na termodynamický přístup určité množství alfa fáze ještě zůstává, bývá eliminováno souborem chemického luhování s výjimkou formy z Y_2O_3 . Pro zajištění dostatečné pevnosti formy z Y_2O_3 je pojivový systém tvořen koloidním roztokem ZrO_2 .

3.6 Další směr vývoje slitin gama TiAl

Budoucnost slitin gama TiAl je ve výrobě součástek pomocí nových moderních technologií. Nejslibněji se jeví; slévárenská metoda odlévání na vytavitelný model nebo do kokil. Gama TiAl je při tavení vysoce reaktivní, proto je nutno řešit metalurgické pochody, probíhající při jejím tavení, navrhovat vhodné tavicí agregáty a materiály forem, aby nedocházelo k reakci taveniny s okolím. Dalším problémem jsou relativně špatné slévárenské vlastnosti, především zabíhavost, kterou se snažíme eliminovat dostatečným přehřátím taveniny, předehřevem formy a pomocí působení vnějších sil. Tyto technologie by měly přispět k výrobě bezvadných součástek, které mají výborné mechanické a fyzikální vlastnosti podporovány nízkou hustotou. Snahou je rovněž docílit „rychlé“ výroby za konkurenční schopnou cenu.

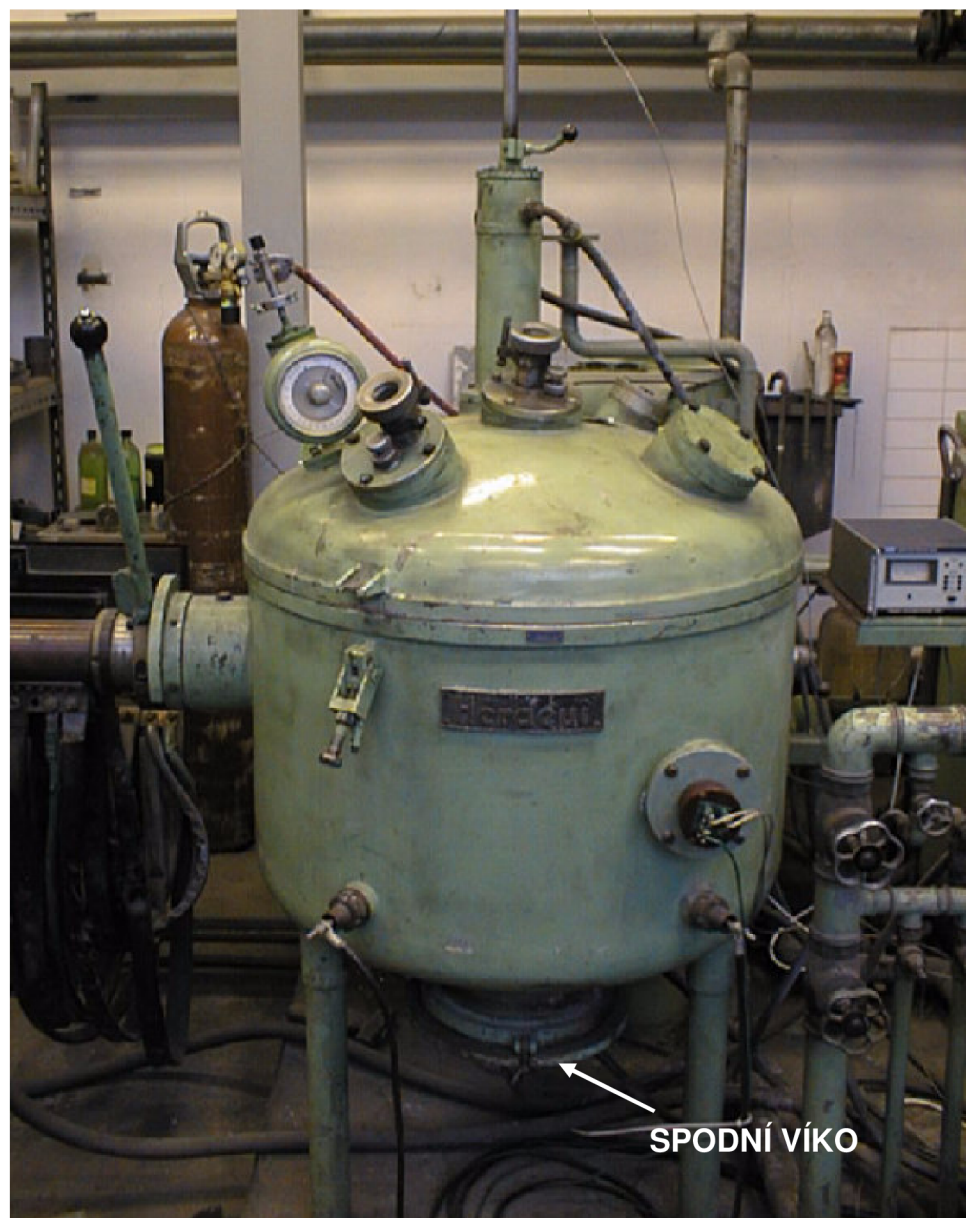
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu je navrhnout a sestrojít mechanismus pro odstředivé odlévání ve vakuové indukční peci. Tento mechanismus nainstalovat a prakticky vyzkoušet při odstředivém odlévání turbínového kola turbodmychadla se zaměřením na posouzení vlivu odstředivé síly na zabíhavost intermetalické slitiny gama TiAl do dutiny skořepinové formy.

4.2 Tavicí agregát

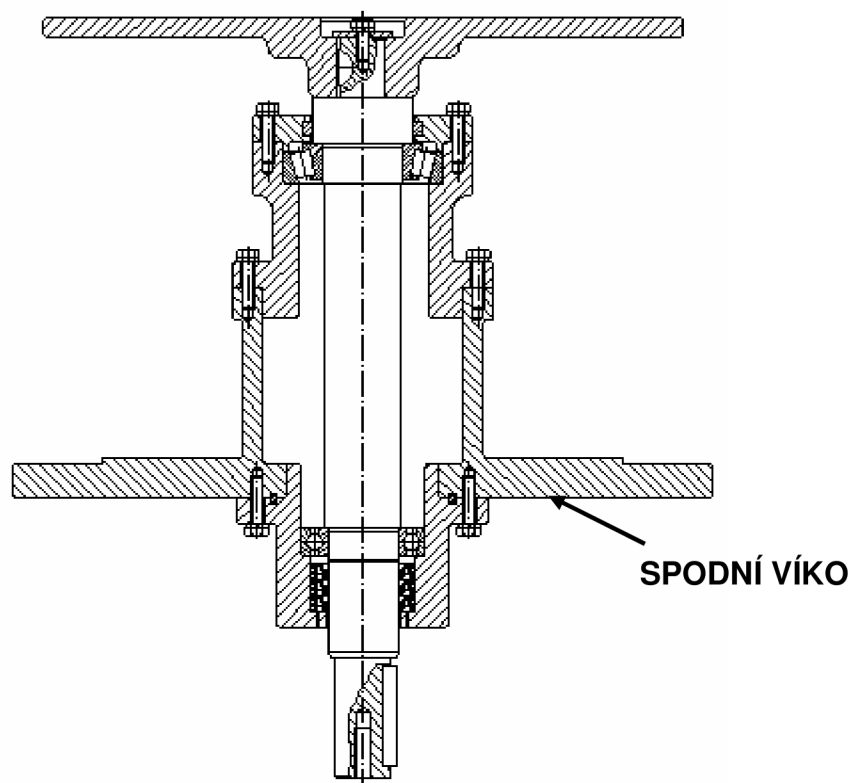
Vývoj odstředivého systému odlévání je určen do středofrekvenční indukční vakuové pece HERAEUS (**obr.21**), typ IS 2/I o frekvenci 4 kHz, s pracovním tlakem uvnitř komory řádově v jednotkách pascalu. Vakua je v peci dosaženo pomocí olejové rotační vývěvy DK 90 a Rootsovy vývěvy R 1600.



Obr.21: Vakuová indukční pec IS 2/I HERAEUS

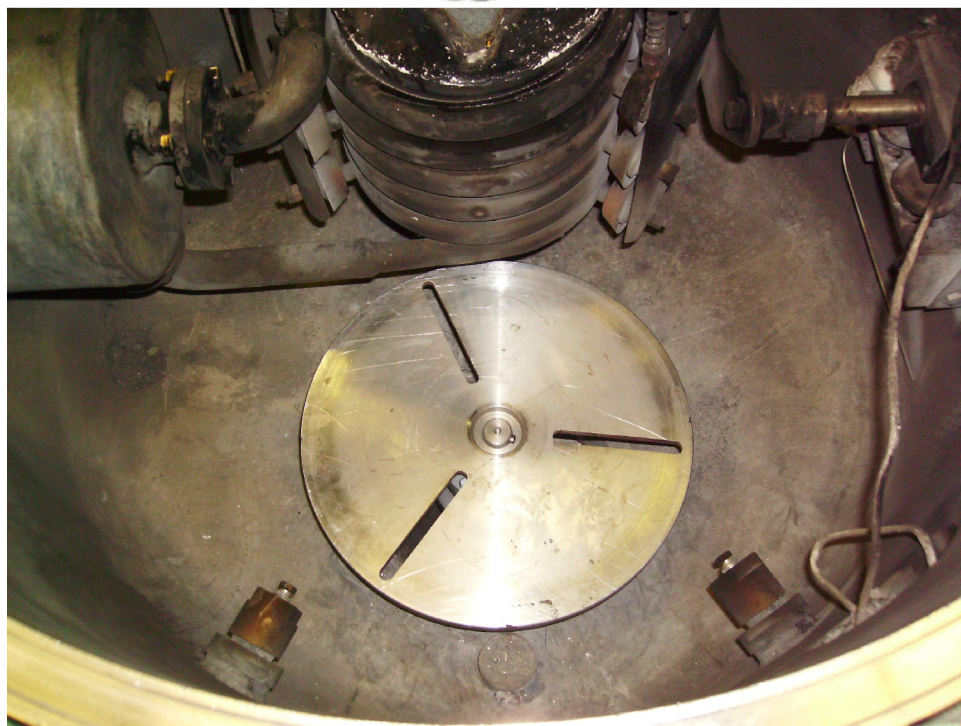
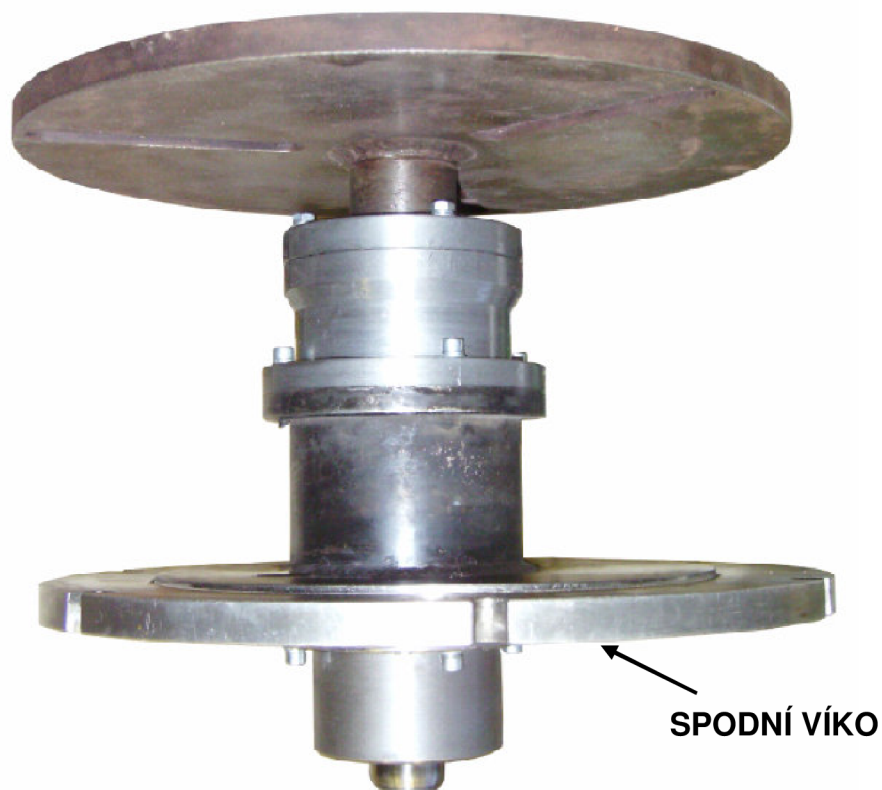
4.3 Návrh odstředivky

Pro možnost odstředivého odlévání bylo třeba sestrojít mechanismus na uvedení skořepinové formy do rotace uvnitř pece, aniž by bylo porušeno vakuum. K tomu byla navržena vertikálně uložená hřídel, uchycená v horní části kuželíkovým ložiskem, které zachycuje i axiální síly a ve spodní části ložiskem kuličkovým (**Obr.22**). Pro zajištění vakua jsou ve spodní části umístěna 3 gufera na výstupu hřídele z pece a nosná deska je s pecí utěsněna pomocí „O“ kroužku. Kompletní výkresová dokumentace jednotlivých dílců je přiložena jako příloha 1 v souboru příloh k této práci.



Obr.22: Schematický nákres konstrukčního návrhu rotačního mechanismu do vakuové pece

Dle předložené výkresové dokumentace byl systém uložení vyroben na zakázku firmou LAC s.r.o.(**Obr.23**) a úspěšně nainstalován do vakuové pece.

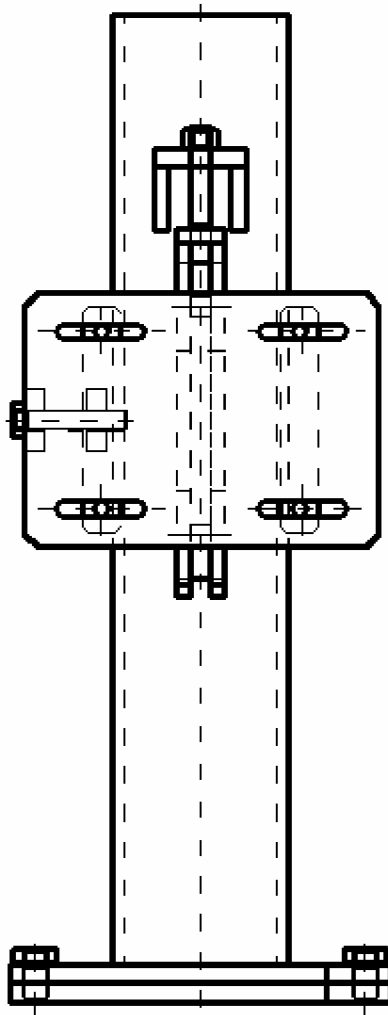


Obr.23: Vyrobená odstředivka od LAC s.r.o.
a její umístění do vakuové pece

Testování ukázalo, že vakuum po odsátí vzduchu z komory pece bylo zachováno bez výraznějšího nárůstu tlaku při vypnutí vývěv, proto bylo možno pokračovat v další instalaci a zprovoznování odstředivky.

Na spodní část hřídele odstředivky byla umístěna dvouřemenná řemenice s profilem SPA. Ze zjištěných dat z odborné literatury byla předběžně stanovena požadovaná rychlost otáček cca na 300/min. Pohon tvoří třífázový asynchronní motor o výkonu 1,1 kW s brzdou, se jmenovitými otáčkami 680/min. Abychom zredukovali otáčky motoru na požadovanou rychlost, byla na odstředivku použita řemenice o Φ 280 mm a na pohon o Φ 125 mm. Výsledná rychlost otáčení odstředivky tedy byla 304/min.

Pro umístění hnacího motoru pro odstředivku, bylo navrženo vertikální uložení motoru v zadní části pece. Systém byl vyroben jako svařenec z jednotlivých dílců dle přiloženého konstrukčního návrhu (**Obr.24**). Výkresová dokumentace uložení elektromotoru tvoří přílohu 2.



Obr.24: Schematický nákres konstrukčního návrhu uchycení elektromotoru pro pohon odstředivky

Motor byl umístěn do zadní části pece a uchycen na nově navržený systém uložení (**Obr.25**). Uchycení umožňuje funkční stavitelnost výšky motoru a napínání hnacích řemenů.



Obr.25: *Pohled na uložení hnacího motoru*

4.4 Spouštění odstředivky

Pro spouštění motoru odstředivky byl sestaven rozvaděč s jističi vybavený spouštěním pomocí softstartéru Sirius 3RW3014-1CB14 (**Obr.26**). Softstartér měl zajišťovat pozvolný náběh motoru na maximální otáčky, aby při startu nedošlo rázem k poškození skořepiny. Tento systém ale nebyl příliš uspokojivý a náběh motoru byl stále relativně prudký.



Obr.26: *Softstartér Sirius*

Pro zastavení rotující skořepiny byla použita brzda, která je součástí elektromotoru, i v tomto případě je však náraz od sepnutí brzdy veliký a hrozí zde nebezpečí poškození skořepiny. Nicméně toto sestavení umožňovalo další testování správnosti návrhu odstředivého zařízení.

4.5 Testování bez rotace

Aby bylo možné celý systém bezproblémově spustit, bylo třeba provést nejdříve několik pokusů nezbytných k potvrzení správnosti navržení a funkceschopnosti systému.

První test zjišťoval velikost vlivu přenosu tepla z předeřáté skořepinové formy na odstředivku během doby tavení slitiny.

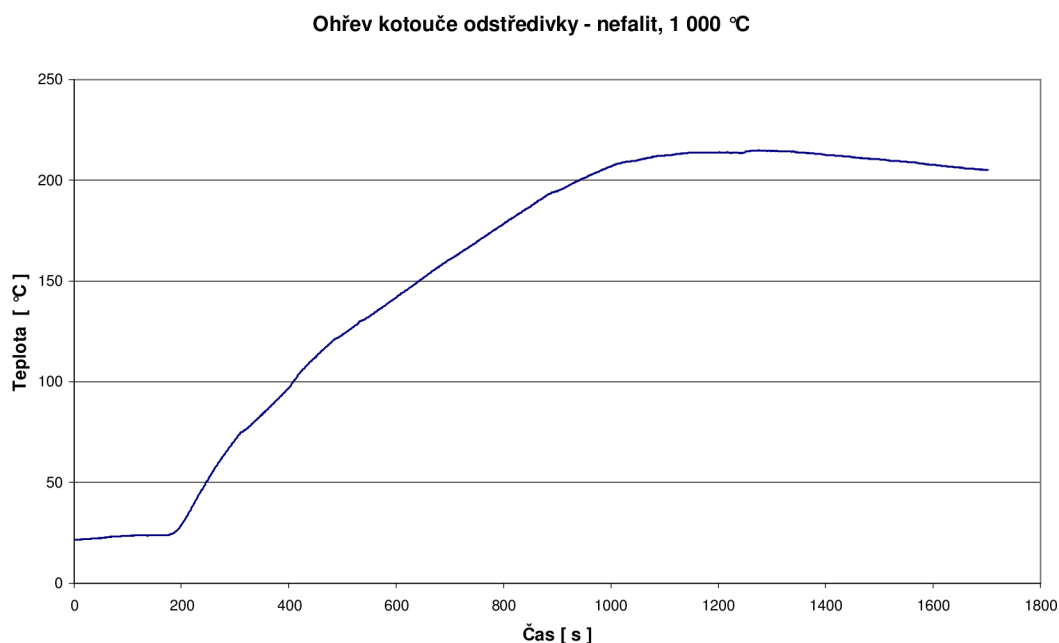
Skořepinová forma je před samotným odléváním předeřátá v elektrické odporové peci LAC M 60/12 vybavené programovým regulátorem teploty INDUSTRY na 1000 °C (**Obr.27**).



Obr.27: Keramická odporová pec LAC a regulátor teploty INDUSTRY

Samotná skořepina je umístěna v ocelové kruhové formě a obsypána lupkem jako tepelnou izolací. Forma je vystředěna a upevněna na horní stůl odstředivky pomocí 3 upínacích čelistí.

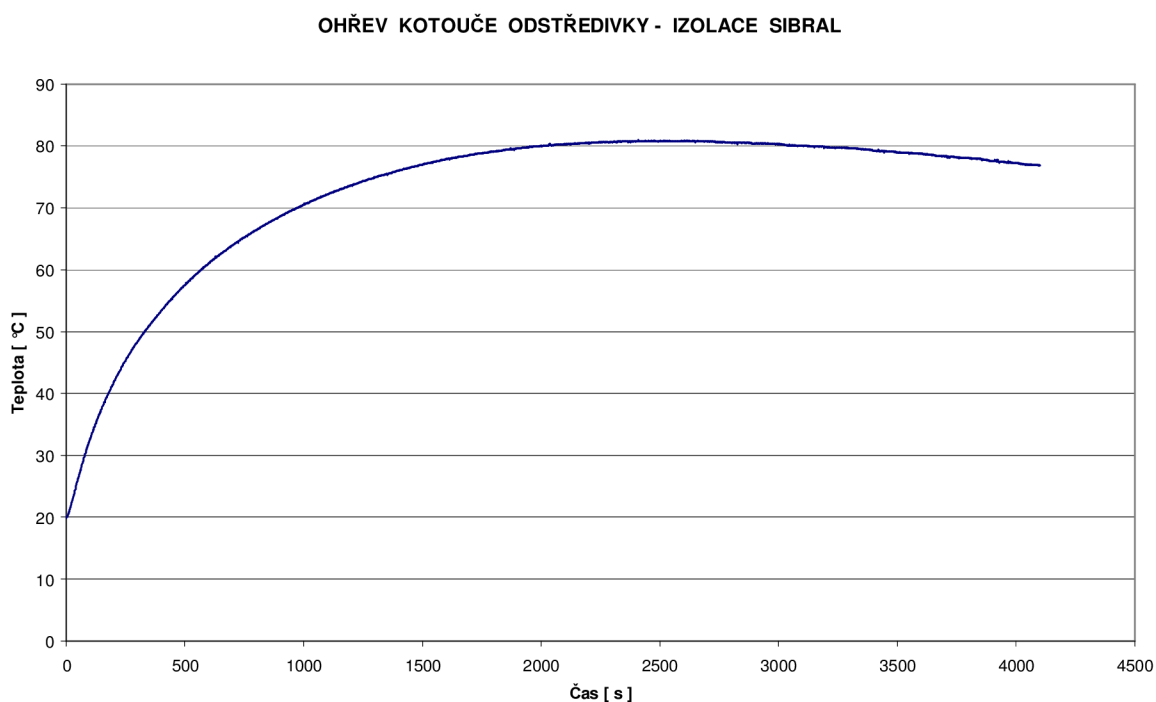
V prvním měření byla mezi formou a odstředivkou použita tepelné izolace z nefalitu. Teplota talíře pod formou narostla během 20 min až na teplotu 213 °C. Teplotní nárůst odstředivky pod formou je zachycen na následujícím grafu (**Obr.28**).



Obr.28: Průběh ohřevu talíře odstředivky od předeřáté formy při použití izolace nefalit 1000 °C

Tento ohřev je dosti výrazný, a i přesto, že teplota neznemožnila správnou činnost odstředivky, bylo další snahou ještě více snížit tepelný vliv teplé formy na odstředivku.

V druhém pokusu byla tedy již v samotné formě použita nejen izolace lupkem, ale i izolace na dně a po obvodu formy sibralem, který vykazuje lepší izolační vlastnosti. Sibralem byl použit i na oddělení a izolaci mezi odstředivkou a teplou formou. Průběh nárůstu teploty odstředivky od skořepiny při použití sibrálu je zachycena na následujícím grafu (**Obr.29**).



Obr.29: *Průběh ohřevu talíře odstředivky od předehřáté formy při použití izolace sibrál*

Z výsledků je patrné, že nárůst teploty je značně menší. Talíř odstředivky dosáhl maximální teploty 81 °C, tedy o 132 °C méně. V dalších pokusech bude jako tepelné izolace používáno sibrálu.

Následným důležitým pokusem prováděným stále bez rotace bylo ověření správného vystředění formy, zajišťující minimální odchylky od osy rotace a vyhovující umístění vtokového kůlu pod hubičku tavicího kelímku, aby mohl být kov co nejpřesněji odléván do vtoku skořepiny. Tento pokus byl prováděn na otevřené peci natavením a odlitím litiny a prokázal správnost umístění osy odstředivky do pece.

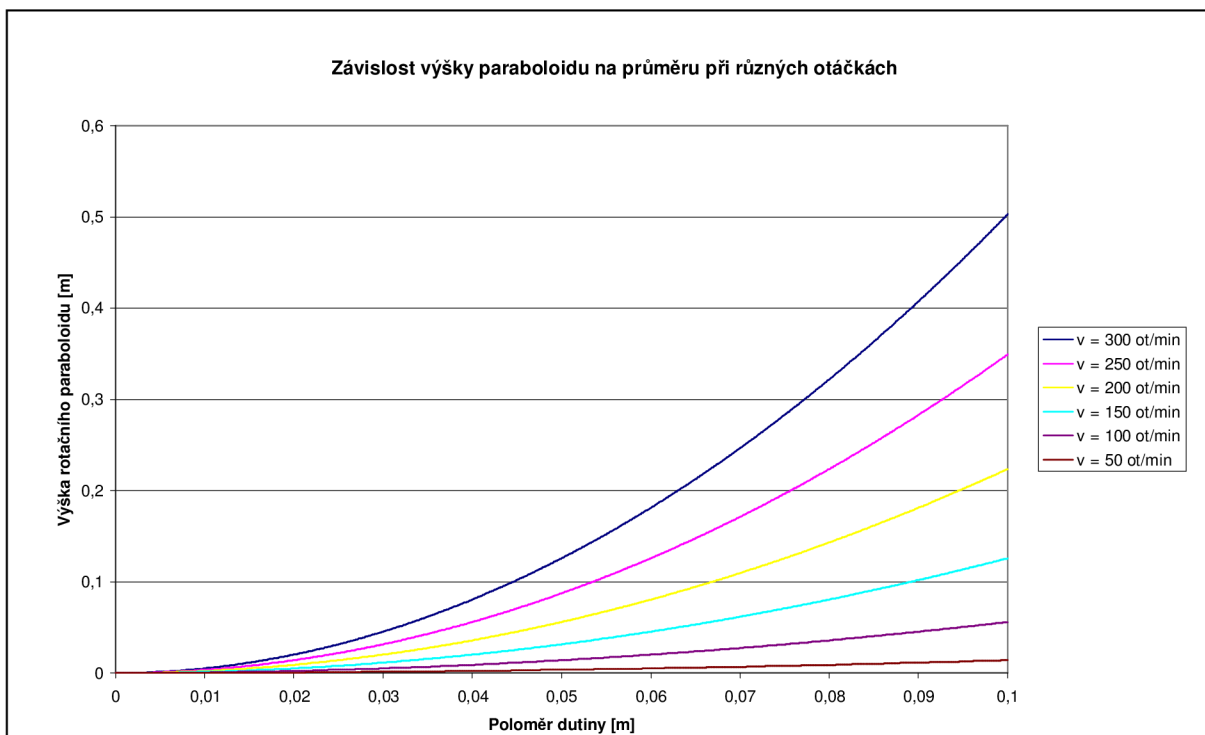
4.6 Testování za rotace

První pokus odstředivého odlévání byl stále ještě prováděn na otevřené peci. Na odstředivku byla umístěna keramická skořepinová forma (**Obr.30**) v rámu s vnějším průměrem 200 mm a uvedena do rotačního pohybu bez komplikací. Test chování taveniny po nalití do dutiny formy byl proveden pomocí odměřené dávky vody. Voda jako testovací medium pro použití na místo taveniny mohla být použita, protože z rozboru chování kapaliny v rotující nádobě nemá na tvar hladiny vliv hustota kapaliny. Testování ukázalo, že současná rychlost otáčení je pro použitou geometrii formy příliš vysoká a velké množství kapaliny bylo ze skořepiny vytlačeno ven.

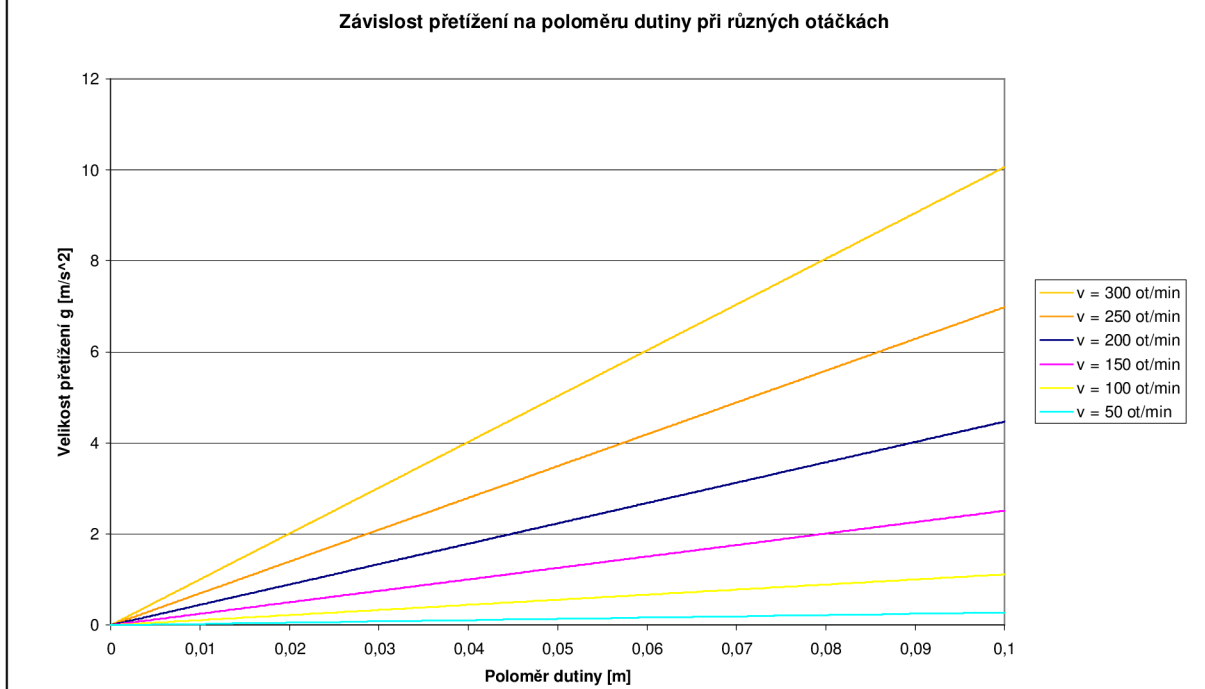


Obr.30: Keramická skořepinová forma

Proto byly provedeny výpočtové modely chování kapaliny za rotace, tedy určení velikosti gravitačního přetížení a určení výšky výstupu rotující hladiny (**Obr. 31,32**).



Obr.31: Graf závislosti výšky hladiny paraboloidu hladiny na průměru dutiny při různých otáčkách



Obr.32: Graf závislosti přetížení na poloměru dutiny při různých otáčkách

Bylo stanoveno, že za našich podmínek působí na taveninu maximální síla až o velikosti desetinásobku gravitačního přetížení a výška hladiny může za rotace dosáhnout až 0,5 m.

Abychom zabránili rozstříkávání taveniny z formy, je možné jít dvěma směry. Buď navrhnutím jiné geometrie skořepiny nebo snížením otáček odstředivky.

4.7 Oběžné kolo turbodmychadla o Φ 115 mm

4.7.1 Nastavení odstředivky pro odlévání

Pro skořepinu tohoto oběžného kola byla ponechána původní geometrie. Výsledný odlitek je umístěn ve spodní části skořepiny s totožnou osou kola jako vtoku. Jedná se tedy o pravé odstředivé odlévání s vertikální osou rotace. Pro úspěšné odlití taveniny musela být ze stanovených dřívějších pokusů nejprve upravena rychlost otáček. Toho bylo dosaženo použitím frekvenčního měniče HITACHI SJ-200 015HFEF (**Obr.33**). Frekvenční měnič umožňuje regulaci otáček elektromotoru pomocí změny frekvence. Další výhodou měniče je i možnost pozvolného náběhu na maximální otáčky motoru a jeho následné dobržďování. Proto nebylo již nadále třeba používat sofstartér a brzdu motoru a dosáhlo se i snížení nebezpečí poškození skořepiny při rozběhu a zastavování odstředivky.



Obr.33: Frekvenční měnič HITACHI

Pro stanovení potřebných otáček bylo nejdříve opět prováděno nejdříve testování s vodou. Odměřená dávka tekutiny potřebná pro odlití oběžného kola byla 420 ml. Tato dávka byla nalita do skořepiny a postupným zvyšováním otáček motoru změnou frekvence bylo stanoveno a následně použito 20 Hz. Při této frekvenci dosahuje rychlost odstředivky 121 otáček za minutu.

4.7.2 Použitá slitina

Požadovaná slitina turbínového kola byla dodána jako ingotová tyč o průměru 70 mm firmou FLOWSERVE CORPORATION, USA pod označením tavby 030874 o chemickém složení: 33,3% Al, 4,9% Nb, 2,7% Cr, 0,28% B a zbytek tvořil Ti.

Slitina byla v peci natavena v keramickém kelímku z Al_2O_3 firmy Morgan.

4.7.3 Použitá skořepina

Forma je vyrobena jako hybridní skořepina s prvními obaly z ZrSiO_4 pojená koloidním roztokem SiO_2 . Další obaly jsou již molochitové (**Obr.34**).



Obr.34: Keramická skořepina turbínového kola o Φ 115 mm

4.7.4 Tavení

Natavení slitiny proběhlo ve vakuové indukční peci HERAEUS. Pro měření teploty taveniny slitin titanu bylo použito termočlánu typu „C“ (W5%Re-W26%Re) firmy OMEGA s ochrannou trubičkou z cermetu $\text{Mo-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ firmy Thermal Ceramics. Signál z termočlánu byl digitalizován pomocí software ADAMView firmy ADVANTECH a převodníku OMR-6018 firmy OMEGA vybaveného low pass filtrem 10 Hz pro odfiltrování střídavých složek signálu.

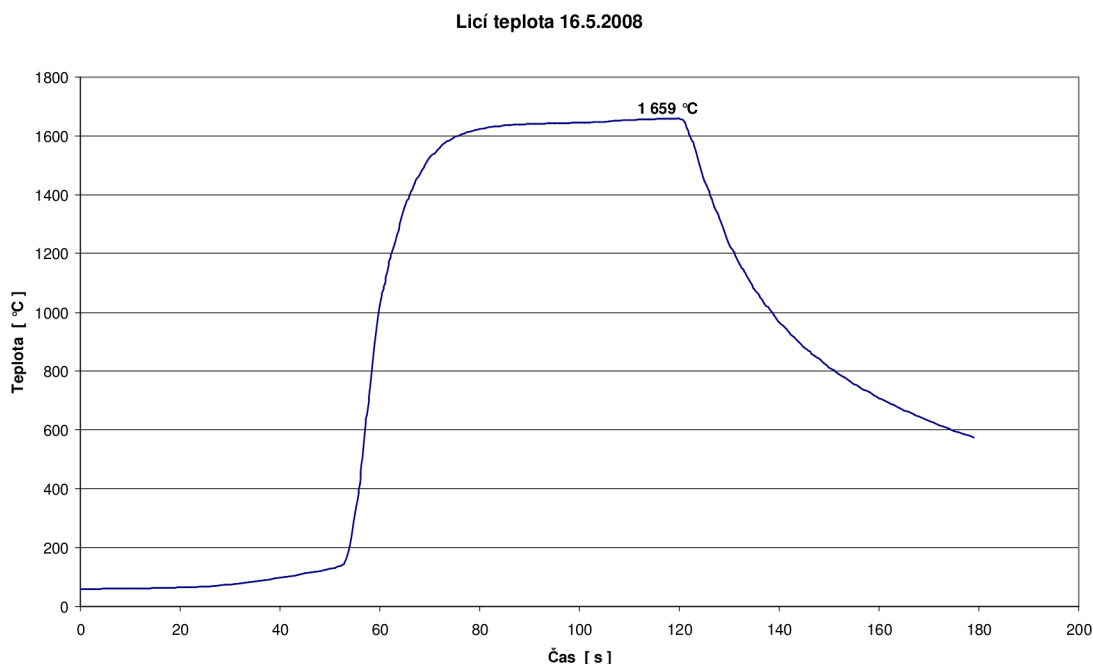
Do tavicího kelímku bylo umístěno předem stanovené množství požadované slitiny a na odstředivku připevněna předeřátá forma se skořepinou (**Obr.35**).



Obr.35: Pohled na uspořádání v peci před tavbou

4.7.5 Odlévání

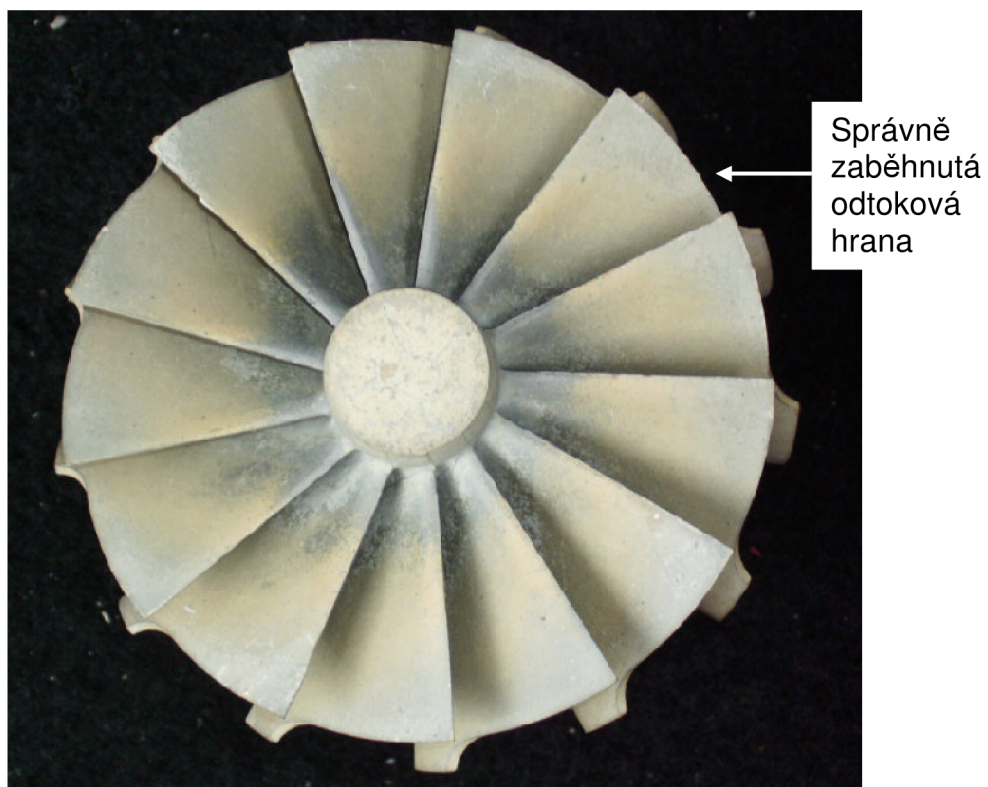
Teplota lití byla 1659 °C (**Obr.36**), rychlost otáček 121/min. Odlití za rotace proběhlo bez komplikací. Natavená slitina byla správně odlita do rotující skořepiny. Po odlití byla odlitá forma opět přenesena do elektrické odporové pece, kde byl nastaven režim pro pozvolné ochlazování, aby se co nejvíce vyloučil vliv vnitřních pnutí.



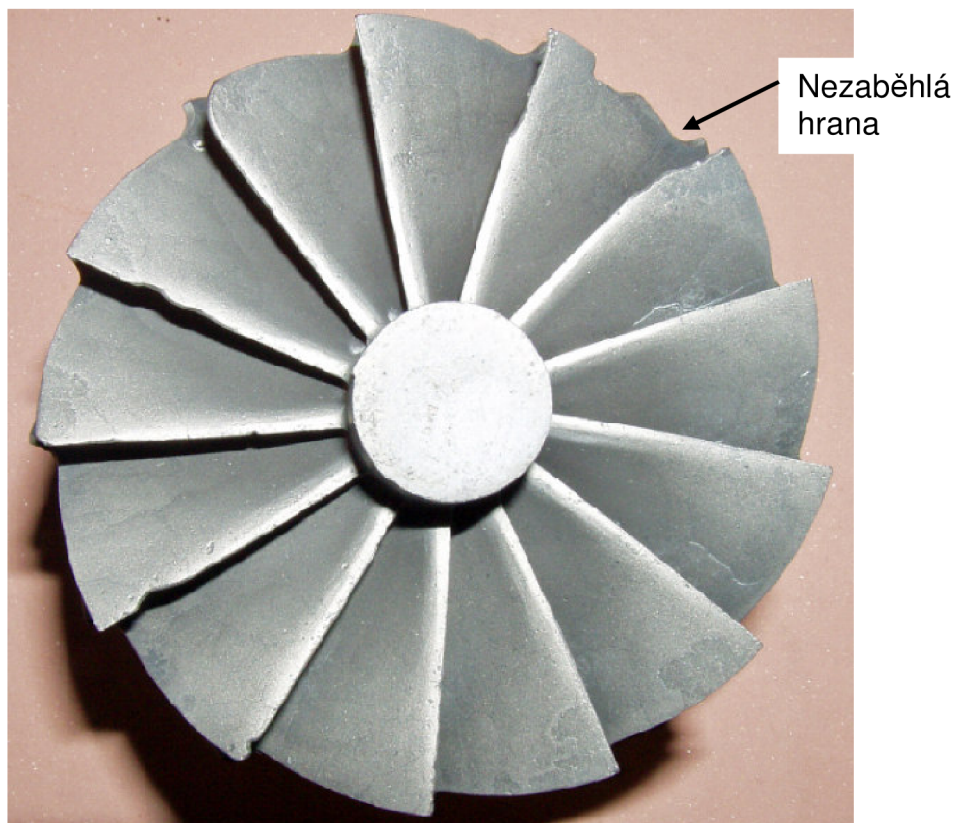
Obr.36: Graf měření licí teploty taveniny

4.7.6 Odlitek

Po ztuhnutí a schládnutí odlitku z něj byla odstraněna skořepina. Výsledný odlitek pak ukázal, že bylo dosaženo zaběhnutí slitiny do všech průřezů a tedy řešení zvyšování zabíhavosti intermetalické slitiny gama TiAl odstředivým odléváním splnilo svůj účel (**Obr.37**). Na **obr. 38** je fotografie stejného oběžného kola litého gravitačně s ukázkou nezaběhlých odtokových hran.



Obr.37: Odlitek oběžného kola $\Phi 115$ mm litého odstředivě



Obr.38: Odlitek oběžného kola $\Phi 115$ mm litého gravitačně

4.8 Oběžné kolo turbodmychadla o Φ 55 mm

4.8.1 Nastavení odstředivky pro odlévání

Pro skořepinu tohoto oběžného kola byla vytvořena nová geometrie. Na vtokový kůl byla umístěna 3 malá oběžná kola po 120° . Výsledný odlitek tedy nemá totožnou osu jako vtok. Proto se jedná o nepravé odstředivé odlévání s vertikální osou rotace. Obsah taveniny byl stanoven pomocí vody na 320 ml pro 25 Hz, jmenovité otáčky jsou 152/min.

4.8.2 Použitá slitina

Použitá slitina odlitku je stejná jako v prvním případě s chemickým složením 33,3% Al, 4,9% Nb, 2,7% Cr, 0,28% B a zbytek tvoří Ti.

4.8.3 Použitá skořepina

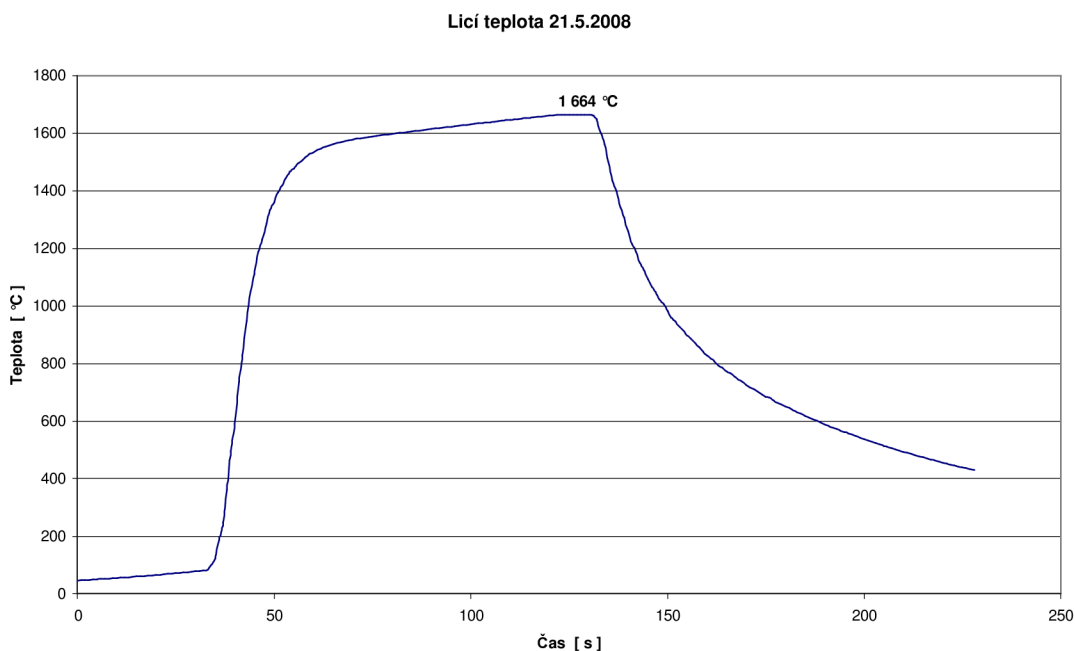
Skořepina je tvořena 4 obaly. Prvními obaly jsou z $ZrSiO_4$ pojená koloidním roztokem SiO_2 . Další obaly jsou již molochitové (**Obr.39**).



Obr.39: Keramická skořepina se 3 turbínovými koly o Φ 55 mm

4.8.4 Tavení a odlévání

Natavení slitiny proběhlo opět ve vakuové indukční peci HERAEUS. Teplota lití byla 1664 °C (**Obr.40**), rychlost otáček bylo 152/min. Odlití za rotace proběhlo opět bez komplikací. Natavená slitina byla odlita do rotující skořepiny. Po odlití byla odlitá forma umístěna do elektrické odporové pece, kde byl nastaven režim pro pozvolné ochlazování.



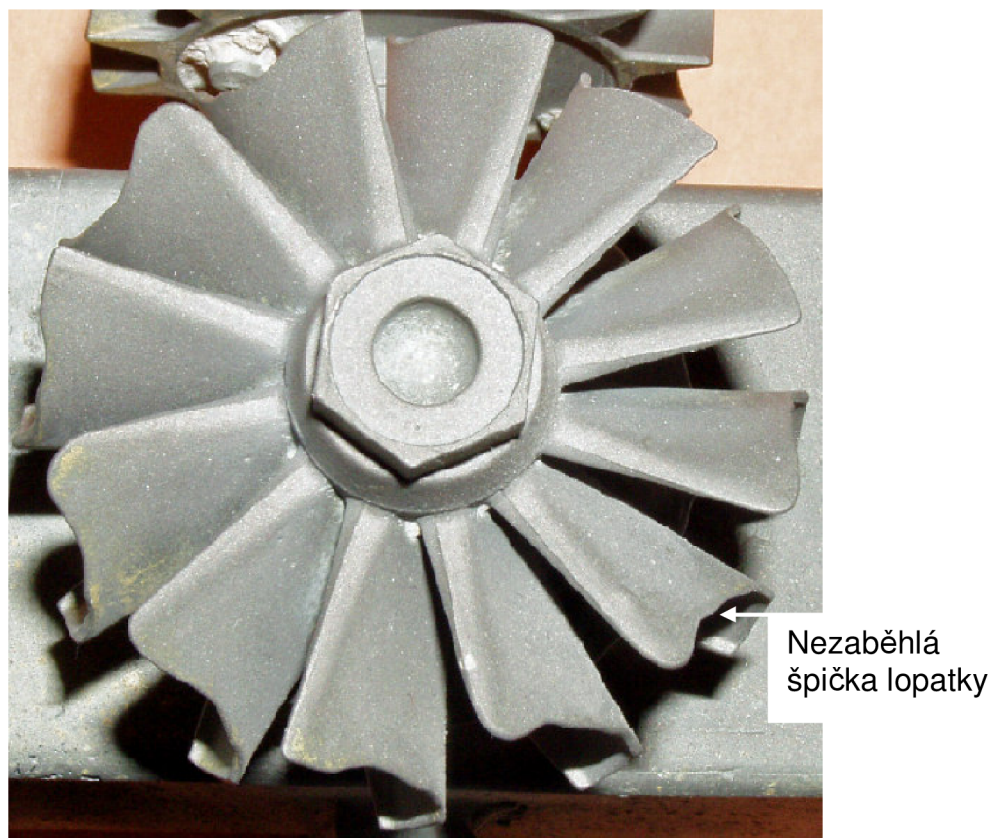
Obr.40: Graf měření licí teploty taveniny

4.8.5 Odlitek

Po ztuhnutí a schládnutí odlitku z něj byla odstraněna tryskáním skořepina. Výsledný odlitek ukázal, že i zde bylo dosaženo zaběhnutí slitiny i do tenkých průřezů a tedy výsledný odlitek dosáhl požadovaného tvaru (**Obr.41**). Na **obr. 42** je pak fotografie stejného oběžného kola litého gravitačně s ukázkou nezaběhlých odtokových hran.



Obr.41: Odlitek oběžného kola Φ 55 mm litého odstředivě



Obr.42: Odlitek oběžného kola Φ 55 mm litého gravitačně

ZÁVĚR

V experimentální části se podařilo dosáhnout požadovaných cílů této práce. Byl sestaven mechanismus pro odstředivé odlévání do indukční vakuové pece, úspěšně instalován a byla ověřena jeho správná funkce a umístění v peci bez porušení vakua za provozu.

Experimenty ukázaly postačující počet otáček sestavení, které je možno regulovat pomocí frekvenčního měniče. Výsledné otáčky pro odlévání tímto způsobem jsou u našeho uspořádání nižší než publikované provozní parametry nebo otáčky v technické praxi ve slévárnách přesného lití v ČR. Tyto odchylky jsou způsobeny v publikacích jiným konstrukčním uspořádáním skořepiny a u sléváren přesného lití jsou otáčky vyšší, protože se jedná o odlévání ocelí na vzduchu.

V našem případě se ukázalo, že i tyto nižší otáčky jsou dostačující a při jejich použití bylo dosaženo zaběhnutí slitiny do všech průřezů, tedy i do tenkých stěn odtokových hran lopatek turbínového kola (**Obr.37,41**). Otáčky jsou také postačující z důvodu možnosti vyššího přehřátí taveniny, umožněného natavením slitiny v keramickém kelímku, které není u metod tavení se studeným kelímkem možné, a proto zde hraje odstředivá síla jen podpůrnou funkci a výsledné otáčky nemusí být tak vysoké.

Pro další směr experimentů navrhuji nalezení optimálních otáček používané metody. Dále doporučuji úpravu horního okraje skořepiny, dle **obr.19**, kdy tato jednoduchá konstrukční úprava umožňuje zabránění vyvržení rotující taveniny ze skořepiny, popř. i možnost dalšího zvyšování otáček. A dalším krokem je nalezení poměru mezi rychlostí otáček a optimální lící teplotou, s cílem dosáhnout co nejnižší lící teploty, protože dřívější experimenty ukázaly, že s rostoucí teplotou dochází k vyššímu rozpouštění kyslíku v tavenině, což je nežádoucí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NĚMEČEK, M. *Prvky B skupin*. Prosinec 2000. [cit. 2008-02-16]. Dostupné na internetu: < <http://web.quick.cz/nemecek/bskup.html> >.
- [2] PTÁČEK, Luděk., a kol. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [3] SUPŠ Turnov. *Technologie*. Zář 2005. [cit. 2008-04-05] Dostupné na internetu: < <http://konstrukce.webz.cz/sups/3too1.html> >
- [4] SUNG, Si-Yuong, KIM Young-Jig. Melting and casting titanium alloys. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 539-543, s. 3601-3606
- [5] TETSUI, Toshimitsu. Development of TiAl Turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science & Engineering: A*, June 2002, vol. 329-331, p. 582-588.
- [6] NODA, T. Application of cast gamma TiAl for automobiles, *Intermetallics*, 1998, vol. 6, no. 7-8, s. 709-713
- [7] WU, Xinhua. Review of alloy and process development of TiAl alloys, *Intermetallics*, September 2005, vol.14, s. 1114-1122.
- [8] APPEL, F., OEHRING, M. Gamma titanium aluminide alloys: Alloy design and properties, Edited by Leynes, CH., Peters, M. *Titanium and titanium alloys*, 2006, GKSS Research Center Geesthacht GmbH, Geesthacht, Germany
- [9] ZEMČÍK, Ladislav a DLOUHÝ, Antonín. Přesné lití odlitků z intermetalických slitin gama TiAl. In *Sborník z konference Metal 2004*, [CD-ROM] Ostrava 2004, s. 1-8
- [10] LORIA, Edward A. Quo vadis gamma titanium aluminide, *Intermetallics*, December 2001, vol.9, no. 12, s. 997-1001.
- [11] ZEMČÍK, Ladislav. DLOUHÝ, Antonín, KRÓL, Stanislaw. PRAZMOWSKI, Mariusz. Vakuová metalurgie intermetalik TiAl, In *Sborník z konference Metal 2005*, [CD-ROM] Ostrava 2005, s. 1-7
- [12] KIM, Myoung-Guyn, et al. Investment casting of near-net shape gamma titanium aluminide automotive turbocharger rotor, *Materials Science Forum*, 2005, vol. 475-479, s. 2547-2550
- [13] TETSUI, Toshimitsu. Development of a new TiAl turbocharger for high temperature use, In *Proceedings of the 3rd International Workshop on γ -TiAl Technologies*, [CD-ROM] Bamberg 2006.
- [14] BLUM, Matthias, et al. Prototype plant for the economical production of TiAl-valves, *Materials Science & Engineering: A*, June 2002, vol. 329-331, s. 616-620.
- [15] LORIA, Edward A. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials, *Intermetallics*, September 2000, vol. 8, no. 9-11, s. 1339-1345.
- [16] FU, P.X., et al. Centrifugal casting of TiAl exhaust valves, *Intermetallics*, August 2007, s. 1-9
- [17] GÜTHER, V., JOOS, Rainer and CLEMENS, H. Microstructure and defects in gamma-TiAl based vacuum arc remelted ingot materials, *GfE Metalle und Materialien GmbH*, Nuremberg 2001

- [18] GÜTHER, V., CHATERJEE, A. and KETTNER, H. Status and prospects of gana-TiAl ingot production, *GfE Metalle und materialien GmbH*, Hoefener str 45., D-90431, Nuremberg 2003
- [19] Hitchine manufacturing Co., Inc. Reactive alloy casting processes, *Technical update*, 2006
- [20] HARDING, R.A., WICKINS, M., WANG, H., DJAMBAYOV, G. a PERICLEOUS, K. The tilt casting of titanium aluminides, *LMPC 2007*, The University of Birmingham, Birmingham, UK, 2007
- [21] VILČKO, Ján a SLOVÁK, Stanislav. *Zlívárenská technológia*, 1. vydání. Vyd. Praha: ALFA. Vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatúry. 1987. 504s. ISBN 063-572-87
- [22] MAŠTOVSKÝ, Otakar. *Hydromechanika*, 1. vydání. Praha: SNTL, Slovenské vydavateľství technické literatury, 1964

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Anglický název	Český název
CLV	Chandley Low-pressure process for Vacuum melt alloys	Antigravitační nízkotlaké vakuové odlévání
EB	Electron Beam Melting	Tavení elektronovým paprskem
FEM	Finite Element Method	Metoda konečných prvků
FVM	Finite Volume Method	Metoda konečných objemů
HIP	Hot Isostatic Pressing	Izostatické lisování za vysokých teplot
ISM	Induction Skull Melting	Indukční tavení ve studeném kelímku
PAM	Plasma Arc Melting	Obloukové tavení plazmou
VAR	Vacuum Arc Remelting	Přetavování obloukem ve vakuu
VIM	Vacuum Induction Melting	Vakuové indukční tavení v keramických kelímcích

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1

Výkresová dokumentace odstředivky:

Název výkresu	Číslo výkresu
Kusovník	1-5071-23/10
Sestava	1-5071-23/00
Talíř	1-5071-23/01
Horní víčko	1-5071-23/02
Mezikus	1-5071-23/03
Příruba	1-5071-23/04
Spodní víčko	1-5071-23/05
Hřídel	1-5071-23/06

Příloha č.2

Výkresová dokumentace uložení motoru:

Název výkresu	Číslo výkresu
Kusovník_uložení	2-5071-23/99
Uložení motoru	2-5071-23/00
Sloup	2-5071-23/01
Napínák	2-5071-23/02
Pevná deska	2-5071-23/03
Lože	2-5071-23/04
Vodítko	2-5071-23/11
Vzpěra	2-5071-23/12
Domeček	2-5071-23/13
Deska	2-5071-23/14
Táhlo	2-5071-23/21
Opěrka	2-5071-23/22
Spojovák	2-5071-23/31
Vodící lišta	2-5071-23/32
Upínací deska	2-5071-23/33
Napínač	2-5071-23/34

