

ABSTRAKT

Práce obsahuje základní údaje o slitinách TiAl z hlediska jejich použití jako konstrukčního materiálu. Je zde dále uveden přehled vlastností těchto slitin, jejich aplikace a technologií výroby polotovarů a součástí z těchto slitin.

Klíčová slova

TiAl intermetalika, aplikace, výrobní proces

ABSTRACT

This work contains basic information about TiAl alloys as their application as constructional materials point of view. Further there is general view of their properties, their application and manufacturing processes.

Key words

TiAl intermetallics, applications, manufacturing processes

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE

VAŠKO, M. Odlévání turbínových kol ze slitin TiAl. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 28 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně, pod vedením pana doc. Ing. Ladislav Zemčíka, CSc. V práci jsem uvedl všechny literární prameny, zdroje a publikace, ze kterých sem čerpal.

V Brně, dne 23.5.2008

Podpis studenta:
Michal Vaško

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Ladislav Zemčíka, CSc. za vedení práce a cenné odborné rady, technickou pomoc a připomínky při vypracování práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1 Charakteristika materiálu TiAl.....	9
2 Aplikace.....	11
2.1 Lancer Evolution.....	13
3 Technologie.....	14
3.1 Příprava slitin (metalurgie).....	15
3.2 Odlévání.....	16
3.2.1 Optimalizace parametrů technologie přesného lití Intermetalických slitin TiAl do keramických forem po indukčním tavení v keramickém kelímku.....	18
3.2.1.1 Reakce při tavení ve vakuové indukční peci.....	19
3.2.1.2 Vedení tepla a termoplastická napětí v soustavě Odlitek – forma.....	22
Závěr.....	25
Literatura.....	26

ÚVOD

Slitiny na bázi gama TiAl představují, vzhledem ke svým fyzikálním a chemickým vlastnostem, vysoce perspektivní materiály pro aplikace vyžadující nízkou hustotu, čili i hmotnost a velmi dobrou odolnost vůči plastické deformaci za zvýšených a vysokých teplot. Mají vysoký bod tání, dobrou oxidačně-korozní odolnost a atraktivní měrnou vysokoteplotní pevnost [1,2,3]. Využívají se pro součásti s rotačním, případně vratným pohybem [4], tedy zejména pro lopatky leteckých a stacionárních spalovacích turbín, turbínová kola turbodmychadel a ventily spalovacích motorů [4,5,6,7]. Pro tyto aplikace byly již provedeny provozní testy. Díky menším hmotnostem u nich přispívají ke zlepšení pracovních charakteristik a ke zvýšení účinnosti.

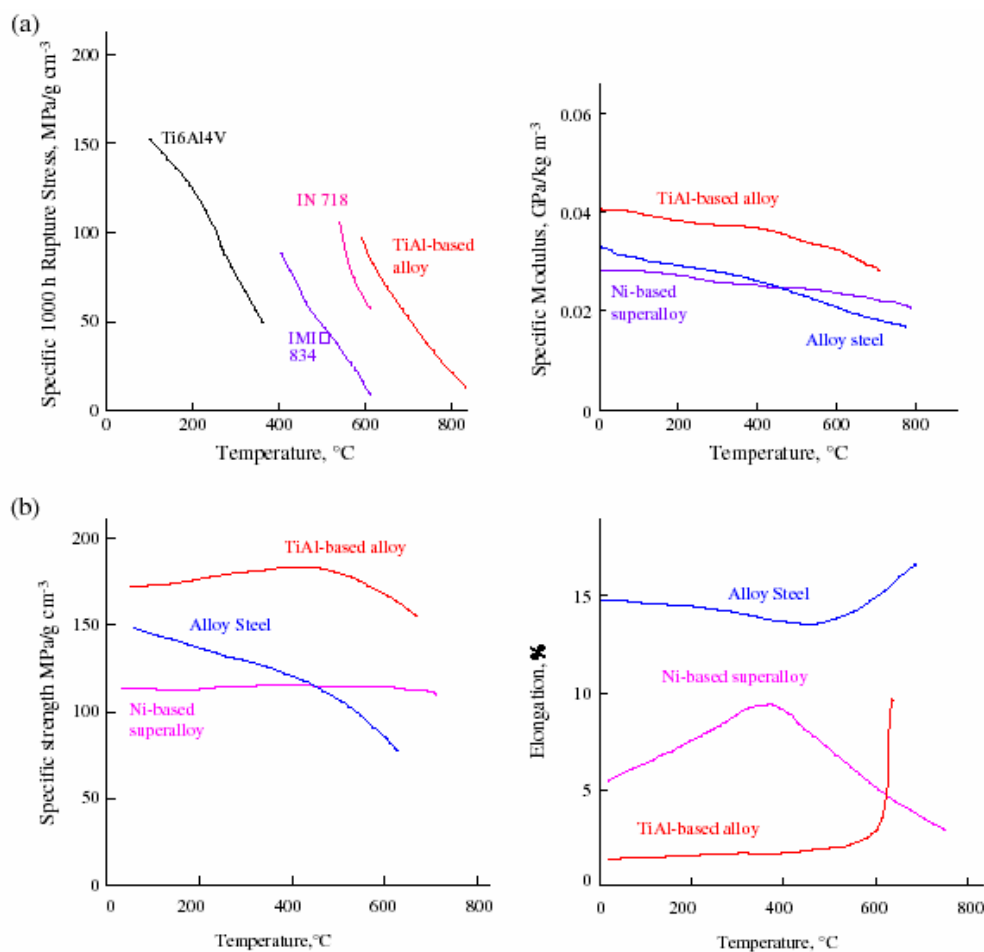
1 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU TiAl

Hlavní úsilí o představení slitin TiAl na trhu se projevilo až v posledních 20 letech. Využívá je pouze malé množství automobilek v automobilovém průmyslu, jako jsou Rolls-Royce, P&W a GE. Vlastnosti slitin TiAl, díky nimž je o ně zájem jsou shrnuty na Obr.1.1(a,b) [8].

Na Obr.1.1(a) je vidět, že zatížení slitiny TiAl měrným lomovým napětím dosahuje lepších výsledků, než u ostatních slitin Ti a Ni.

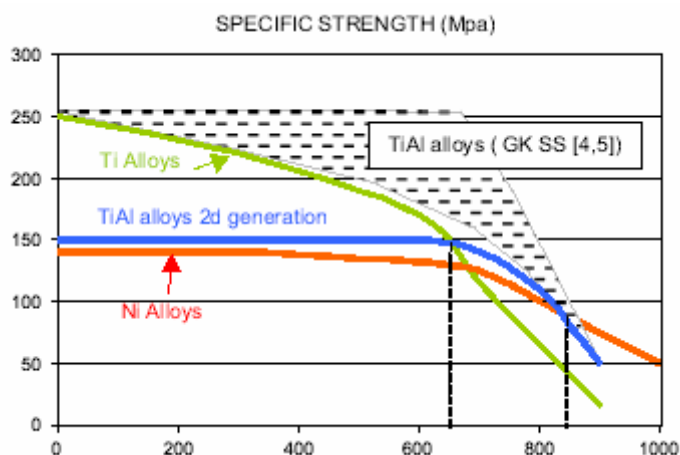
Vlastnosti na Obr.1.1(b) ukazují vlastnosti slitiny TiAl jako funkci teploty mezi pokojovou teplotou a 800°C. Data opět ukazují, že slitiny TiAl mají vyšší měrnou pevnost, než slitiny oceli, nebo vysocetegované slitiny Ni.

Na Obr.1.2 je porovnání měrné pevnosti slitin TiAl a slitin Ti a Ni. Je zde zaznačena slitina druhé generace a třetí generace TiAl. Je zřejmé, že slitiny TiAl třetí generace mají mnohem větší možnost využití, než slitiny druhé generace. Bereme-li v potaz jen sílu, tak druhá generace slitin TiAl nemůže nahradit slitiny Ti a je lepší, než slitiny Ni jen ve velice úzkém teplotním rozsahu (650-800°C) [9].



Obr.1.1 (a) Měrné lomové napětí, jako funkce teploty pro slitiny TiAl

(b) Měrná pevnost a tvárnost, jako funkce teploty pro slitinu oceli, slitinu Ni a slitinu TiAl [8]



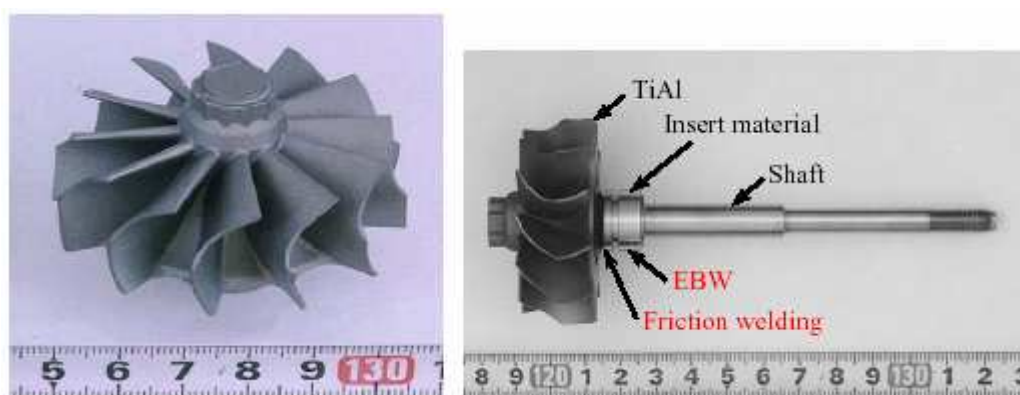
Obr.1.2 Specifická síla slitin TiAl v porovnání se slitinami Ti a Ni. (Modrá křivka je pro slitiny TiAl druhé generace, černá plocha je pro slitiny TiAl třetí generace) [9]

Naštěstí jsou slitiny TiAl zajímavé také při nízkých teplotách. Jsou tedy vhodné pro výrobu kompresorových pouzder, lopatek a ochranných plášťů. U všech těchto aplikací je předpokládána úspora hmotnosti kolem 20% u malých součástí (Lopatky, kryty, listy) a kolem 50% u pouzder.

Zatímco měrná pevnost slitin TiAl je vyšší, než u konkurenčních materiálů, tvárnost za pokojové teploty je nízká. Většinou je pro všechny slitiny TiAl tvárnost 1% i pokud jsou zpracovány. Nízká tvárnost je největším problémem slitin TiAl v jejich aplikaci, jakožto konstrukčních prvků. Důvodem je, že tvárnost 1% je obecně akceptováno jako minimální přípustná úroveň u odlitých součástí [8].

2 APLIKACE

Navzdory problémům se slitinami TiAl, popsáním dále v textu, jsou tyto slitiny používány v automobilovém průmyslu. V roce 1998 byl nejvýznamnější vývoj v Japonsku, kde se ze slitin TiAl začaly vyrábět turbodmychadla do vozů Lancer (o těchto vozech bude ještě pojednáno níže). Bylo jich vestavěno asi 1 000 kusů a díky vynikajícím zkušenostem se počet automobilů s vestavěným turbodmychadlem druhé generace rapidně zvýšil. V roce 2003 bylo již ve 20 000 automobilech [8]. Odlitky turbínových kol těchto turbodmychadel jsou vidět na Obr.2.1.



Obr.2.1 Odlitek turbínového kolečka turbodmychadla ze slitiny TiAl [8]

V současné době vyrábí turbodmychadla ze slitin TiAl mnoho společností a úspěšná aplikace této slitiny vede k rozvoji technologie lití.

Ve vozech formule 1 bylo mnoho let používáno termomechanicky zpracovaných ventilů, kde cena nehrála zásadní roli. Formule 1 však zakázala jejich používání [10]. Pokusy o vývoj odlévání ventilů ze slitin TiAl byly úspěšné (Obr.2.2) co se týče výkonnosti, ale jsou pořád příliš nákladné, jelikož výše odpadu je příliš velká a cena surového materiálu pořád roste.

Hlavní Evropský 5-letý program, který začal v roce 2005 směřuje k výrobě 40 cm dlouhých turbínových lopatek leteckých motorů, zdokonalením technologie lití a produkcí jemnozrnných odlitků, které mají přijatelné vlastnosti. Jedná se o ambiciózní projekt, ale nízká hmotnost je pro turbínové lopatky rozhodující [8].

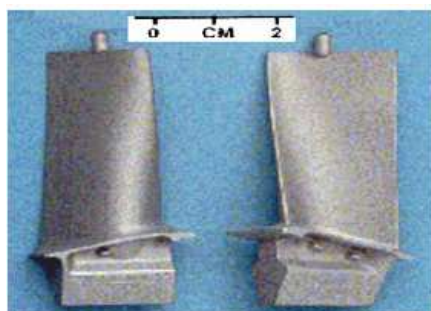
Všechny dominantní podniky na výrobu motorů s použitím slitin TiAl měly ověřovací programy, z nichž například Snecma a Turbomeca udělaly několik ověření o proveditelnosti použití různých procesů (slévání, protlačování, kování, prášková metalurgie) Obr.2.3-2.5. Několik ověření bylo technologicky úspěšných.

Vyhlídky pro nárůst aplikací slitin TiAl do budoucna záleží na několika faktorech. Prvním z nich je vývoj nízko nákladového zpracování součástí s reproduktivními a přijatelnými vlastnostmi. Dalším je zajištění dodávky homogenních ingotů k pokrytí stále se zvyšující poptávky. Jedním z největších problémů ve využití slitin TiAl pro lití, nebo pro termomechanické zpracování je heterogenost ingotů. Posledním faktorem je nízkoteplotní zkřehnutí. Toto zkřehnutí je povrchový efekt, který vymizí po odstranění oxidační vrstvy.



Obr.2.2 Odlitky ventilů ze slitiny TiAl [8]

Vypadá to, že dvě největší společnosti pro výrobu velkých motorů civilních letadel jsou zavázány k užití slitin TiAl v příští generaci motorů, což je velice povzbudivou zprávou pro ty, kdo se v posledních letech podíleli na jejich vývoji a zpracování [8].



Obr.2.3 Malé odlitky turbínových lopatek (Turbomeca helicopter engines) [9]



Obr.2.4 Odlitek segmentu turbínových [9]



Obr.2.5 Kompresorové pouzdro [9]

2.1 Lancer Evolution

Nově vyvinuté turbodmychadlo ze slitiny TiAl bylo poprvé užito pro výrobu TD05, jednoho z modelů turbodmychadel od Mitsubishi Heavy Industry (MHI). Toto turbodmychadlo bylo použito u automobilů série Lancer Evolution od firmy Mitsubishi Motors Corp. a prodávalo se od ledna 1999. Do roku 2006 bylo prodáno více jak 40 000 vozů Lancer Evolution (Obr.2.6) a více jak 15 000 vozů Subaru Legacy (Obr.2.7), které užívá turbodmychadel TD 04 [11]. Na Obr.2.6 je vidět automobil Lancer Evolution VI a TD05 turbodmychadlo. Toto turbodmychadlo bylo také převzato do světového šampionátu v Rally a jeho skvělé schopnosti přispěly k vítězství na světovém šampionátu v roce 1999 [12].



Obr.2.6 Automobil Lancer Evolution VI a turbodmychadlo TD05 [12]

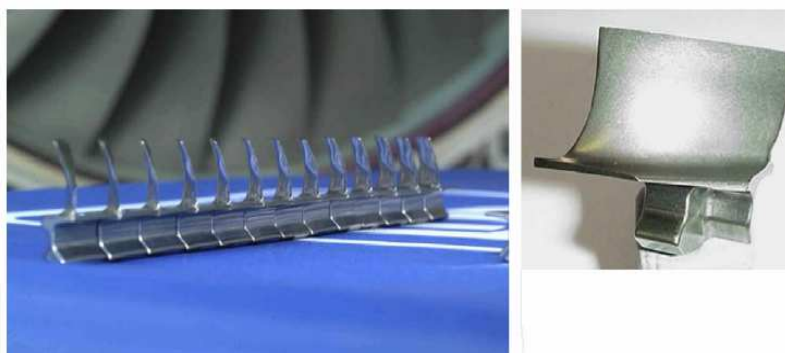
Obr.2.7 Automobil Subaru Legacy [11]



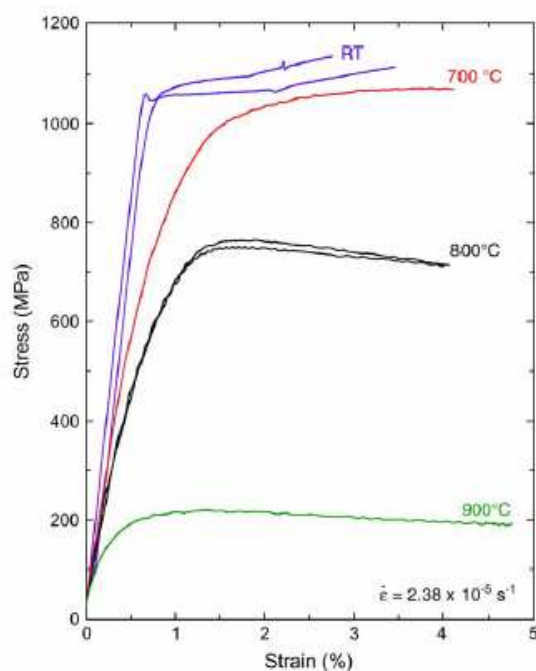
3 TECHNOLOGIE

Jedním z největších problémů, které oddalují výrobu strojírenských součástí ze slitin TiAl je jejich zpracování. Pro výrobu lopatek kompresorů k testování bylo použito technologií protlačování a kování. Toto zpracování je však velmi finančně náročné. Lopatky na Obr.3.1 jsou tímto způsobem zpracovány pro firmu Rolls-Royce. Mají výbornou vysokoteplotní pevnost zobrazenou na Obr.3.2 [8].

Otázkou ale zůstává, zda jsou výsledky testů v porovnání s cenou dostačující. Tyto lopatky jsou pouze pár centimetrů dlouhé a přesto při výrobě již vznikají problémy s mikrostrukturou. Při výrobě ingotů by tyto problémy byly mnohem větší. K výrobě těchto součástí jsou další dvě možnosti řešení a to lití a prášková metalurgie. Tyto technologie nabízejí nižší cenové náklady. Cenově nejvýhodnější spolehlivou metodou se ukázalo být odlévání [8].



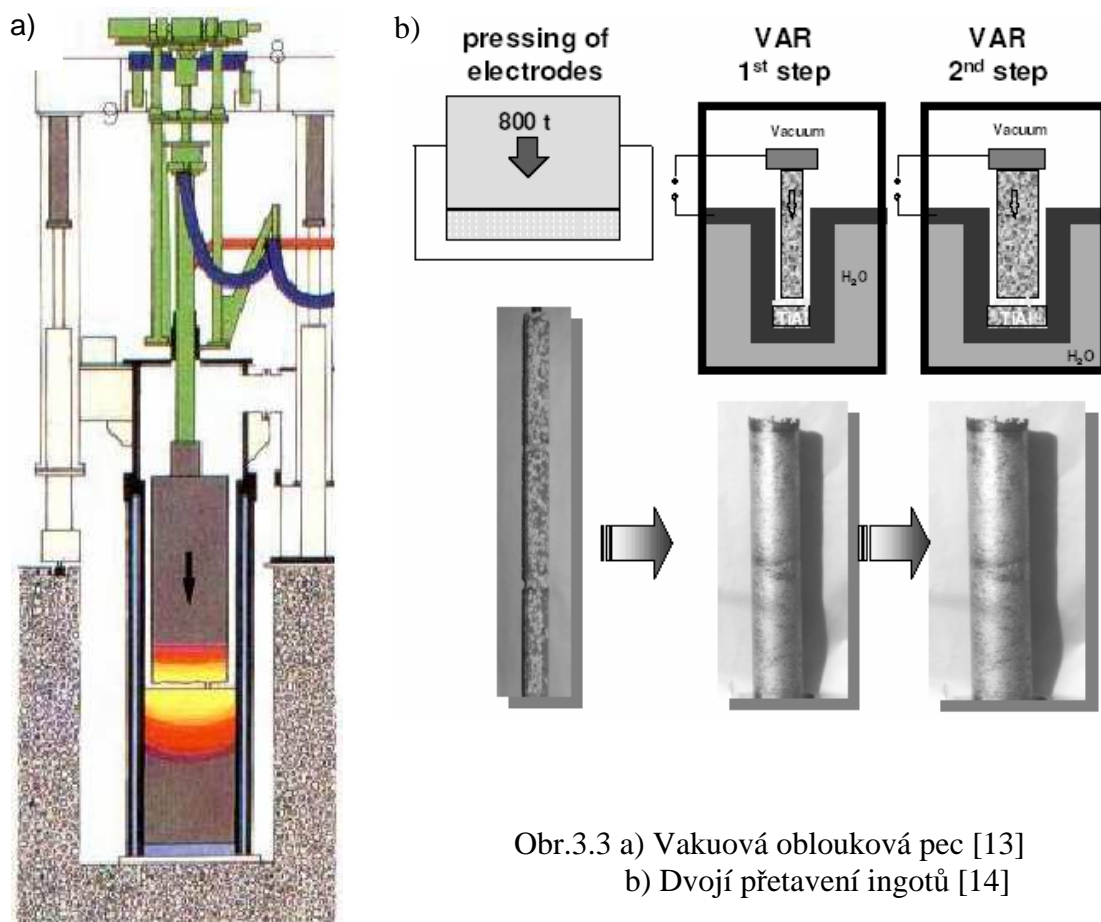
Obr.3.1 Kompresorové lopatky ze slitiny TiAl vyrobeny pomocí protlačování a kování pro firmu Rolls-Royce [8]



Obr.3.2 Mechanické vlastnosti jako funkce teploty pro slitinu TiAl, použitou k výrobě kompresorových lopatek Obr.3.1 [8]

3.1 Příprava slitin (metalurgie)

Přetavovány jsou ingoty tvaru válcové tyče, zhotovené dvojným přetavením ve vakuové obloukové peci (vacuum arc remelting-VAR) Obr.3.3.



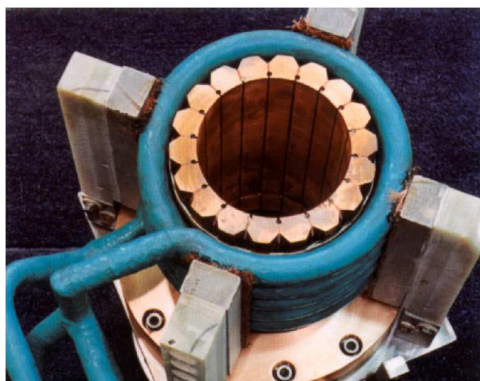
Obr.3.3 a) Vakuová oblouková pec [13]

b) Dvojný přetavení ingotů [14]

Tavení ve vakuové obloukové peci (VAR) je plynulé přetavování odtavné elektrody pomocí elektrického oblouku ve vakuu. Oblouk je vytvořen mezi elektrodou a vodou chlazenou základovou deskou měděné formy. Teplota oblouku taví špičku elektrody a ve vodou chlazené měděné formě, nebo kelímku se tvoří ingot. K odstranění vad ingotů při procesu VAR je nutno kontrolovat navzájem se ovlivňující parametry, jako použití homogenní elektrody, přetavovací rychlost, výšku tekuté lázně a elektrický oblouk. Tato metoda není vhodná pro menší součásti, pouze pro součásti velkých jednoduchých tvarů (ingoty).

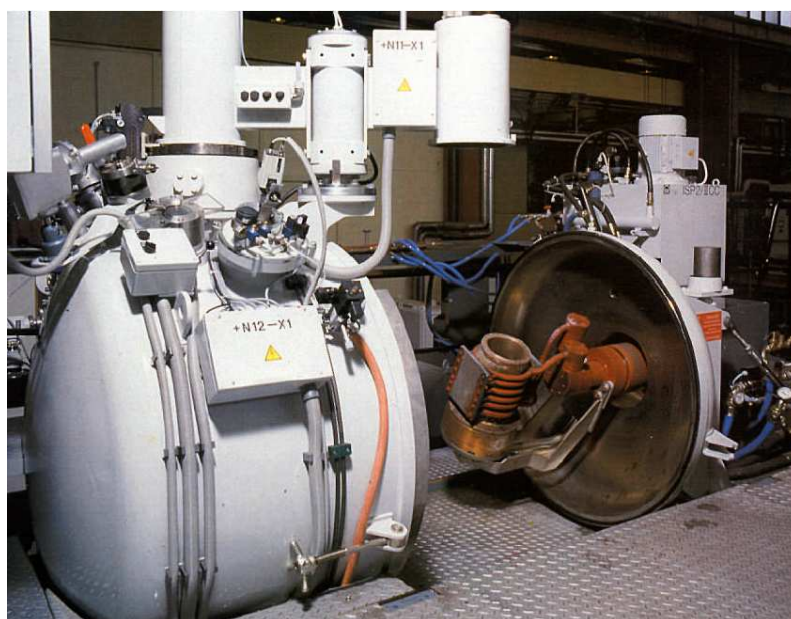
3.2 Odlévání

Při výrobě intermetalických součástek se často využívá přesného lití metodou vytavitelného modelu [15]. Pro slitiny obsahující titan však představují řadu obtíží reakce mezi taveninou a materiály keramického kelímku a keramické formy. Dlouhodobější kontakt TiAl taveniny s keramickými kelímky (v řádu desítek minut) vede k nežádoucímu zvýšení obsahu kyslíku ve finálním odlitku a ten, spolu s vyšším obsahem intersticiálních nečistot, je považován za příčinu křehkosti, jež limituje aplikační možnosti slitin TiAl [16].



Obr.3.4 Studený kelímek, tvořený měděnými, vodou chlazenými lamelami

Slitiny TiAl, které se využívají především na turbínová kola turbodmychadel, lopatky nízkotlakých stupňů spalovacích turbín a stacionární díly leteckých turbín, jsou v současné době odlévány do keramických skořepinových forem přesným litím, zhotoveným technologií vytavitelného modelu ve vakuových indukčních pecích se studeným kelímkem, tvořeným měděnými, vodou chlazenými lamelami Obr.3.4. Tato technologie minimalizuje možnosti reakcí mezi taveninou a kelímkem a je označována jako Induction Skull Melting (ISM) Obr.3.5 [4,17,18].



Obr.3.5 Induction Skull Meeting (ISM)

ISM však přináší řadu nevýhod:

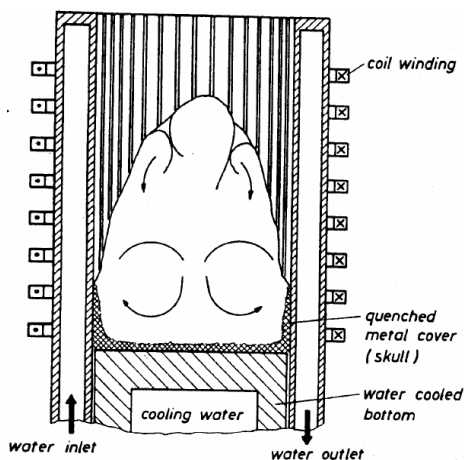
1. Vysoké náklady, zejména vysoká pořizovací cena tavící pece a zavedení ISM technologie do stávajících vakuových tavíren. Pece jsou energeticky náročné, mají nízkou účinnost a jsou neekonomické a neekologické.
2. Podstatná část energie potřebné k tavení je převedena na odpadní teplo chladicí vody [19], což má spolu s výkonem induktoru vliv na přehřátí taveniny. Nízké dosažitelné přehřátí taveniny [20] vede k problémům se zabíhavostí a tím k neodstranitelným vadám u tenkostěnných odlitků.
3. Velká spotřeba chladicí vody a interního plynu.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem byla zkoumána možnost navázat proces přesného lití intermetalických slitin TiAl na běžné indukční tavení v keramickém kelímku. Zdokonalení tohoto výrobního procesu je v dnešní době klíčové z hlediska širšího uplatnění uvedených intermetalik v praxi.

Lití odlitků je buď konvenční gravitační [21], nebo antigravitační. Pro snížení ztrát tepla a zvýšení přehřátí taveniny se snižuje plocha kontaktu taveniny s měděným kelímkem metodou levitačního tavení Obr.3.6.

Odlévání odlitků je prováděno antigravitačním litím (Chandley low-pressure process for vacuum melt alloys - CLV) Obr.3.7 [4,7]. Technologie spojující přednosti levitačního tavení ve studeném kelímku a antigravitačního nízkotlakého lití je označována jako LEVICAST proces [4,7].

Mimo jiné existuje například také technologie lití do kokil, která se využívá pro velkosériovou výrobu odlitků výfukových ventilů spalovacích motorů [22,23].



Obr.3.6 Metoda levitačního tavení

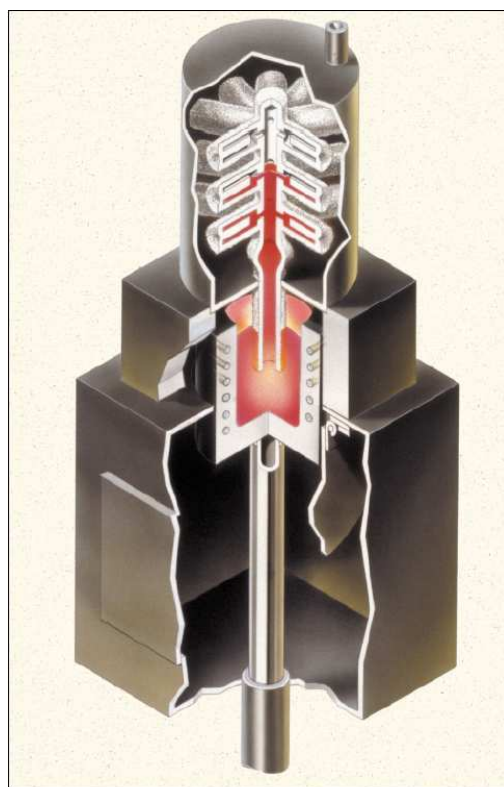


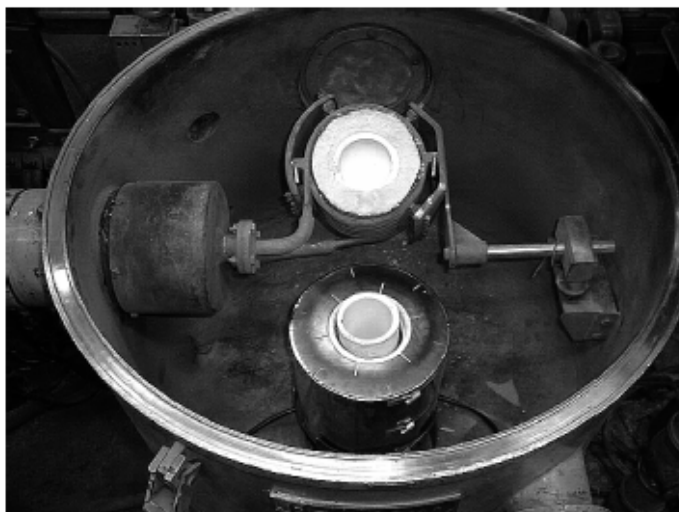
Figure 6. Countergravity low-pressure vacuum melt (CLV) process.

Obr.3.7 Antigravitační lití CLV

3.2.1 Optimalizace parametrů technologie přesného lití intermetalických slitin TiAl do keramických forem po indukčním tavení v keramickém kelímku

Parametry procesu musí být optimalizovány tak, aby odlitky neobsahovaly makroskopické vady a vyhovovaly jakostí předpokládaným aplikacím.

Problematika odlévání odlitek ze slitin gama TiAl metodou přesného lití pomocí vytavitelného modelu je předmětem řešení projektů GAČR na pracovištích Oboru slévárenství UST, VUT – FSI, Brno a Ústavu fyziky materiálů AV ČR.



Obr.3.8 Vakuová indukční pec IS2/I HERAEUES vybavená odporovou pecí firmy LAC Rajhrad [24]

Předmětem je hodnocení metalurgických a technologických možností vakuové indukční pece osazené keramickým kelímkem. Používá se vakuové indukční pece IS2/I HERAEUES vybavené odporovou pecí od firmy LAC Rajhrad pro předehřev keramických skořepinových forem Obr.3.8.

Následuje gravitační lití do keramické zirkon-molochitové skořepinové formy zhotovené metodou vytavitelného modelu. Během experimentu bylo zjištěno, že bez problému lze do keramických skořepinových forem odlévat pouze odlitky jednoduchého tvaru, jakými jsou například turbínové lopatky Obr.3.9.



Obr.3.9 Odlitek turbínové lopatky [24]

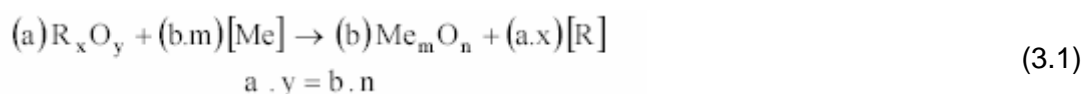
Obsahy kyslíku se během přetavení dramaticky nezvýšily, a tudíž je konečný obsah kyslíku za předpokladu nízkého obsahu kyslíku ve výchozích ingotech přijatelný. Při odlévání odlitků komplikovaných tvarů, jakými jsou například oběžná kola radiálně axiální turbíny plnicího turbodmychadla se na listech lopatek začaly objevovat trhliny, zřejmě vzniklé jako důsledek kombinace brzděného smršťování v nepoddajné keramické formě a neschopnosti slitiny vznikající napjatost akomodovat plastickou deformací [24].

3.2.1.1 Reakce při tavení ve vakuové indukční peci

Pro úspěšné tavení slitin typu gama TiAl ve vakuové indukční peci, osazené keramickým kelímkem, je nezbytné vyřešit základní metalurgické problémy, vyvolané poměrně vysokými licími teplotami spojenými s reakcemi mezi taveninou a žárovzdorninami kelímků a keramických forem, s vypařováním hliníku z taveniny a s reakcemi taveniny se zbytkovými plyny v komoře pece (atmosférou tavícího agregátu) [25,26].

A) Reakce složek slitiny [Me] s žárovzdorninami R_xO_y obsaženými ve stěně kelímku

Obecná rovnice:



Experimentální tavby jsou prováděny ve vakuové indukční peci IS2/I HERAEUS.

K tavení je používáno korundových kelímků dvou výrobců (chemické složení - tabulka 3.1):

1. Isopressed Alumina Induction Crucible, Thermal Ceramics UK Ltd.
2. Isostatically Presed Alumina Crucible, Capital Refractories Ltd.

Tabulka 3.1 Chemické složení kelímků (hm. %) [27]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O/K ₂ O
Thermal	9	90	0,2	0,1	0,1	0,5
Capital	1,8	97,5	0,1	0,1	0,1	

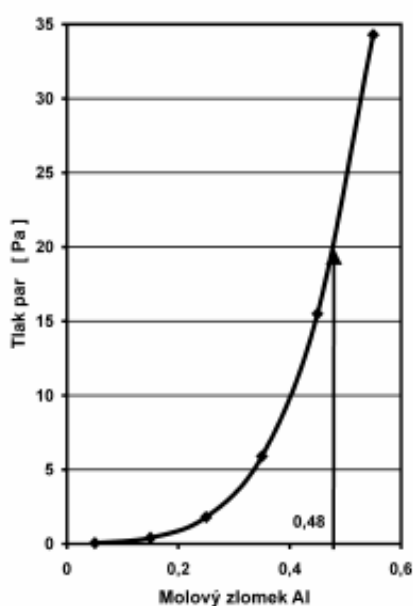
Pro vlastní experimentální práce byla vybrána slitina Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B (at.%), která vykazuje alespoň minimální tažnost při pokojové teplotě v rozmezí 0,5 až 1% [28] a data o creepové pevnosti této slitiny jsou dostupná v ÚFM, Brno, pro její různé mikrostrukturní modifikace [29].

Výpočet termodynamické pravděpodobnosti průběhu reakce (3.1) byl tedy proveden pro uvedenou slitinu směrného složení Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B (at.%) a teplotu taveniny 1 900 K (1 627°C) [25,26,30].

Výsledky se stanovily pro významně zastoupené oxidy v kelímku, kterými jsou Al_2O_3 a SiO_2 .

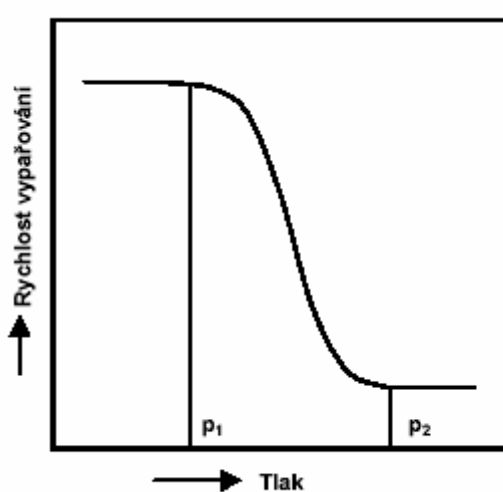
Výsledky výpočtů ukázaly, že reakce Ti s Al_2O_3 je termodynamicky nepravděpodobná. V případě reakcí Ti a Al s SiO_2 lze předpokládat napadání SiO_2 a obohacování taveniny křemíkem. To je jedním z možných vysvětlení tvorby částic typu AlTi_4Si_2 v odlitcích s tím, že ve výchozích ingotech nalezeny nebyly [31].

B) Vypařování hliníku z taveniny

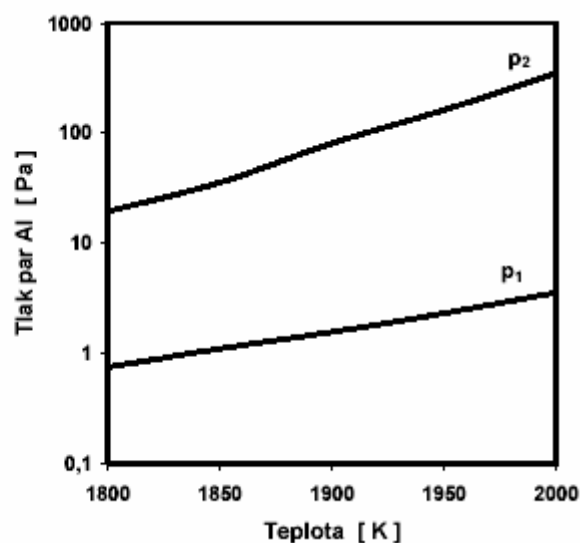


Tlak nasycených par hliníku v závislosti na jeho koncentraci při teplotě 1 900 K dle [28] uvádí Obr.3.10. Tlak nasycených par hliníku při teplotě 1 900 K pro molový zlomek $x_{\text{Al}} = 0,48$ činí 19,7 Pa [25], tavení ve vakuu by proto bylo doprovázeno snižováním obsahu Al ve slitině, a tudíž je vhodné napouštět pec před začátkem natavování interním plynem. Na rychlost vypařování má významný vliv tlak v komoře vakuové pece (dále p). Existují dvě kritické hodnoty tlaku (p_1 a p_2) [32] Obr. 3.11 a 3.12

Obr.3.10 Tlak nasycených par Al [24]



Obr.3.11 Závislost rychlosti vypařování Al na tlaku v komoře [27]



Obr.3.12 Vliv teploty taveniny na krit. tlaky [27]

Tlaky p_1 a p_2 byly v Obr.3.12 zkonstruovány pomocí rovnic v závislosti na teplotě a koncentraci Al [32]. Pro teplotu 1900 K a koncentraci $x_{Al} = 0,48$ je $p_1 = 1,583$ Pa a $p_2 = 81,401$ Pa.

Je-li: $p < p_1$ je rychlost vypařování největší

$p > p_2$ je rychlost vypařování nejmenší

Proto by měl být tlak v komoře vakuové pece menší než p_2 . Dosáhneme toho napuštěním pece argonem.

C) Reakce taveniny se zbytkovými plyny v komoře pece (atmosférou tavícího agregátu)

Reakce probíhají při ustavování rovnováhy mezi kyslíkem a dusíkem atmosféry vakuové pece a taveninou. Poměrně stálá hodnota parc. tlaků plynů, zejména kyslíku a dusíku v pecní atmosféře se udržuje natékáním netěsnostmi, což je ustaveno do dyn. rovnováhy pomocí čerpací rychlosti vývěrového systému pece.

Reakce probíhající při ustavování rovnováhy mezi kyslíkem atmosféry vakuové pece a taveninou lze popsat:



Pro oba základní kovy slitiny byly vypočteny hodnoty rovnovážných tlaků kyslíku k posouzení interakcí mezi taveninou a pecní atmosférou [25].

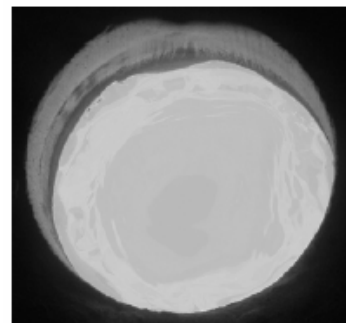
Tab.3.2 Rovnovážné tlaky kyslíku [27]

Me	Me_mO_n	p_{O_2} [Pa]
Ti	TiO	$1 \cdot 10^{-13}$
Al	Al_2O_3	$8 \cdot 10^{-14}$

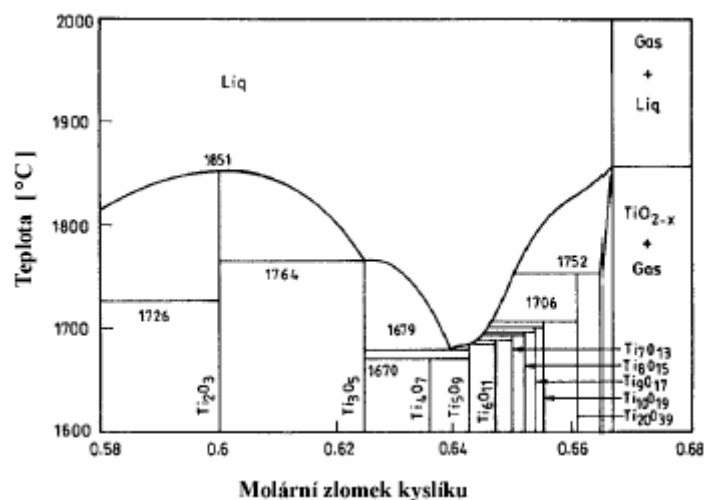
Rovnovážné tlaky kyslíku pro obě základní složky taveniny jsou velmi nízké, a tudíž při tavení ve vakuu, nebo v interní atmosféře je jejich dosažení nepravděpodobné.

I přesto je při tavení uvedené slitiny pozorována kovově čistá hladina (Obr. 3.13), jelikož titan rozpouští poměrně značná množství kyslíku.

Maximální rozpustnost činí 66,7 at.% (~ 40 hm.%) při teplotě 1 870°C Obr.3.14 [33]. Ve výchozím stavu má tavenina 0,05 hm% kyslíku (představuje nenasycený roztok) a po fyzikální absorpci kyslíku následuje na hladině jeho rozpuštění, nikoli však chemisorpce, vedoucí ke vzniku oxidů na hladině.



Obr.3.13 Čistá hladina taveniny [24]



Obr.3.14 Binární fázový diagram Ti – O (detail) [27]

3.2.1.2 Vedení tepla a termoplastická napětí v soustavě odlitek – forma

Jedním z klíčových stádií procesu je chlazení soustavy intermetalického TiAl odlitku a keramické formy, během kterého mohou v odlitku vznikat praskliny. Byly optimalizovány jak teploty formy v okamžiku lití, tak i kinetika chlazení s cílem minimalizovat napjatost v odlitku, jež vzniká v důsledku rozdílu mezi koeficienty teplotní roztažnosti intermetalika TiAl a materiálu keramické formy. Dle [34] bylo experimentálně zjištěno, že parametry procesu (předehřev keramické formy, kinetika chlazení soustavy odlitek – forma), vedoucí k výrobě jakostních odlitků niklových slitin jsou v případě slitiny Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B zcela neuspokojivé.

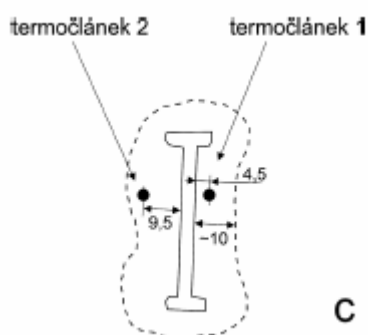
Komponenty vykazovaly praskliny (Obr.3.15), vzniklé vlivem značného tahového napětí, indukovaného v odlitku během chlazení. Napjatost vzniká na základě brzděného smršťování odlitku, zapříčiněného rozdílnými hodnotami koeficientů teplotní roztažnosti materiálů formy a dlitku. (Materiál odlitku se smršťuje rychleji, než materiál formy).



Obr.3.15 Praskliny v TiAl odlitku oběžného kola turbodmychadla, které jsou důsledkem růstu napětí v soustavě odlitek – forma během chlazení na pokojovou teplotu [34]

Optimalizace vedení tepla a termoplastická napětí v soustavě odlitek – forma pro slitiny TiAl

Experimentální data, týkající se vedení tepla a odhadu napjatosti v soustavě odlitek – forma byla zjišťována na odlitku ve tveru nosníku z TiAl dle Obr.3.16:



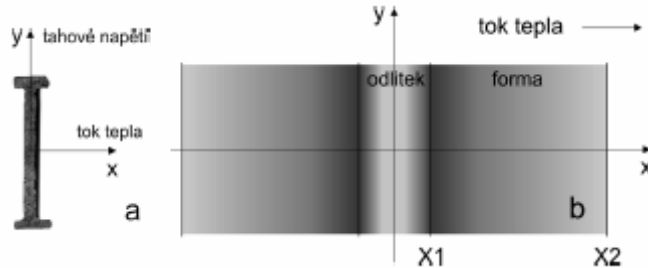
Horní a dolní žebra kotví nosník v keramické formě a přispívají tak bržděným smršťováním ke vzniku tahového napětí v rovině nosníku, kolmé na roviny obou žeber.

Při experimentu byly porovnány výsledky, dosažené licím experimentem a výsledky, dosažené numericky s využitím programového prostředí Mathematica 5.0 od společnosti Wolfram Research. Vedení tepla i tahové napětí lze považovat za 1D.

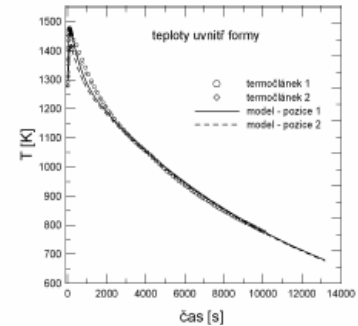
A) Při kontrole vedení tepla byly při chladnutí soustavy na pokojovou teplotu porovnány výsledky, odečtené pomocí dvou termočlánků, umístěných ve stěně keramické formy v různých vzdálenostech od povrchu odlitku (Obr.3.16c) a výsledky vypočtené numericky na základě 1D modelu z osy x ve stejných místech formy, jako byly umístěny termočlánky Obr.3.17. Odchylka byla minimální (Obr.3.18) a byla pravděpodobně způsobena uvolněním latentního tepla z odlitku, které vzniká při transformaci pevné fáze $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ a které se do modelového výpočtu nezahrnuje. Tato odchylka však není významná.

Obr.3.16 Pohled na rovinu (a) a na příčný řez experimentálním odlitkem TiAl nosníku (b) a (c), jehož horní a dolní žebro kotví odlitek v keramické formě, a tím přispívají k růstu tahového napětí v rovině nosníku během chladnutí odlitku; teplotní změny v keramické formě během lití, tuhnutí a chladnutí odlitku jsou registrovány dvěma termočlánky, jejichž plocha je vyznačena v (c); rozměry jsou dány v mm [34]

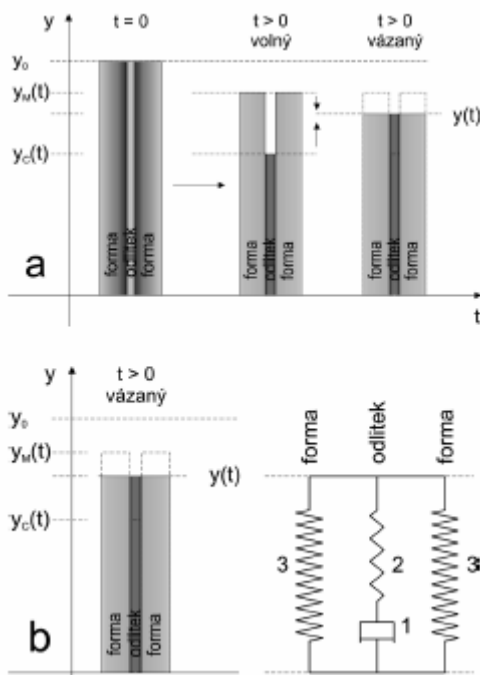
B) Výsledky vedení tepla jsou vstupem do programového modulu, simulujícího vznik termoplastických napětí ve směru osy y Obr.3.17.



Obr.3.17 Příčný řez experimentálním odlitkem TiAl nosníku a jeho orientace v soustavě souřadnic použité v numerickém modelu (a); schematické znázornění směru toku tepla podél osy x z TiAl odlitku (oblast 0-X1) přes keramickou formu (oblast X1 - X2) do okolního prostředí vakuové pece (oblast $x > X2$) (b) [34]



Obr.3.18 Porovnání chladících křivek měřených termočlánky 1 a 2 (Obr.3.9) uvnitř stěny keramické formy během lití. Krystalizace a chladnutí odlitku s křivkami, vypočtenými na základě 1D modelu [34]



Obr.3.19 Schematické znázornění smrštění odlitku a formy se vzájemně rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti během chladnutí z lící teploty pro volný odlitek (střední situace) a ukotvený odlitek (situace vpravo) (a): Mechanický model pro případ kotveného odlitku (b) [34]

Brzděné smršťování (odlitek je ve formě ukotven pomocí horního a dolního žebra) je na rozdíl od volného smršťování (mezi odlitkem a formou neexistují žádné kotvící body) během poklesu teploty spojeno s ustavením rovnováhy mezi tahovou silou působící v odlitku a tahovou silou působící v keramické formě, což vede ke vzniku napětí Obr.3.19a. (Brzděné Obr.3.19a vpravo, volné Obr.3.19a uprostřed).

Odlitek podstupuje jak deformaci plastickou (creep), tak i deformaci elastickou, zatímco keramická forma pouze deformaci elastickou Obr.3.19b.

Jedním z hlavních cílů optimalizace je snížení termoplastického napětí v odlitku na minimum. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro slitinu Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B při této kombinaci počátečních podmínek: Počáteční teplota keramické formy: 1300K Způsob chlazení soustavy: Pomalý režim chlazení v peci

Tyto odlitky vykazují po odstranění formy dobrou jakost bez vad typu nezaběhnutí, praskliny a povrchových staženin. Optimalizace však nezahrnuje mikrostrukturu odlitků.

ZÁVĚR

Jak již bylo zmíněno dříve, slitiny na bázi gama TiAl představují, vzhledem ke svým fyzikálním a chemickým vlastnostem, vysoce perspektivní materiály pro aplikace vyžadující nízkou hustotu, čili i hmotnost a velmi dobrou odolnost vůči plastické deformaci za zvýšených a vysokých teplot.

Využití slitin gama TiAl v širším měřítku je však podmíněno zvýšením spolehlivosti a dostupnosti těchto materiálů v technické praxi. Limitujícím faktorem je nízká tažnost, omezené možnosti tváření při nízkých a středních teplotách a doposud nevyřešený problém při vývoji a provozní aplikaci finančně méně náročných technologií výroby komponent.

LITERATURA

1. KAWAURA, H., KAWAHARA, H., NISHINO, K., SAITO, T.: New surface treatment using shot blast for improving oxidation resistance of TiAl-base alloys, *Materials Science and Engineering A329-331*, 2002, p. 589.
2. KUANG, J. P., HARDING, R.A., CAMPBELL, J.: Microstructures and Mechanical properties of an investment cast gamma titanium aluminide, *Materials Science and Technology*, Vol. 15, July 1999, p. 840.
3. KUANG, J. P., HARDING, R. A., CAMPBELL, J.: Examination of defects in gamma titanium aluminide investment castings, *International Journal of Cast Metals Research*, 2000, 13, p. 125.
4. NODA, T. Application of Cast Gamma TiAl for Automobiles. *Intermetallics*, 1998, No 6, p. 709-713
5. LORIA, E.A.: Quo vadis gamma titanium aluminide, *Intermetallics* 9, 2001, p. 997.
6. YAMAGUCHI, M., INUI, H., ITO, K.: High-temperature structural intermetallics, *Acta Materialia*, 48, 2000, p.307.
7. TETSUI, T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering*, 2002, A329-331, p. 582-588
8. XINHUA, WU. Review of alloy and process development of TiAl alloys IRC in Materials, The University of Birmingham, Edgbaston, B15 2TT, UK
9. LASALMONIE, A. *Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines?* Received 1 September 2005; received in revised form 1 December 2005; accepted 9 January 2006 Available online 2 May 2006
10. Plansee. Private communication.
11. TETSUI, T. Development of a New TiAl Turbocharger for High Temperature Use: 2006, Bamberg 3rd International Workshop on gamma TiAl Technologies.
12. TETSUI, T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles *Nagasaki Research and Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 5- 717- 1, Fukahori-machi, Nagasaki 851- 0392, Japan*
13. GÜTHER, V., CHATTERJEE, A. and KETTNER, H. Status And Prospects Of gamma TiAl Ingot Production *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society, <2003> GfE Metalle und Materialien GmbH; Hoefener Str. 45; D-90431 Nuremberg, Germany,*
14. GÜTHER, V., OTTO, A., KESTLER, H., CLEMENS, H., Processing of gamma TiAl based ingots and their characterization
15. LARSEN, D. E.: Status of Investment Cast Gamma Titanium, Aluminides in the USA, *Materials Science & Engineering, A*, 213, 1996, s. 128 – 133.
16. KAWABATA, T., TADANO, M., IZUMI, O.: Effect of Purity and Second Phase on Ductility of TiAl, *Scripta Metall.*, 22, 1998, s. 1725 – 1730.
17. DEMUKAJ, N.: Development of a new type titanium casting technology/LEVICAST process. In: 2001 JACT Investment Casting Seminar, Tokyo 2001, p. 13.
18. REED, D. S., JONES, M. L.: Investment Casting of Induction Skull Melted Titanium and Reactive Alloys, *AFS Transactions*, 99, 1991, s. 697 – 700.

19. HARDING, R. A., WICKINS, M., LI, Y. G.: Progress towards the Production of High Quality Gamma TiAl Castings, in: Structural Intermetallics 2001, ed. Hemker, K. J. et al., Warrendale, PA: TMS, 2001, s. 181 – 189.
20. MI J., HARDING R.A., WICKINS M., CAMPBELL J. Entrained oxide films in TiAl castings. *Intermetallics*, 2003, No 11, p. 377-385
21. BAUR, H., WORTBERG, D.B., CLEMENS, H. Titanium aluminides for automotive applications. In Proceedings of Symposium *Gamma Titanium Aluminides 2003*. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2003, p. 23-31
22. BLUM, M. et al.: Prototype plant for the economical production of TiAl-valves, *Materials Science & Engineering A329-331*, 2002, p. 616.
23. CHOUDHURY, A., BLUM, M.: Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in permanent mold, *Vacuum*, Vol. 47, 1996, No. 6-8, p. 829.
24. ZEMČÍK, L., DLOUHÝ, A. Tavení intermetalických slitin typu gama TiAl ve vakuových indukčních pecích. *Slévárenství*. 2004. LII(6). p. 223 – 227. ISSN 0037-6825.
25. ZEMČÍK, L., DLOUHÝ, A. Tavení intermetalických slitin typu gama TiAl ve vakuových indukčních pecích. *Slévárenství*, 2004, roč. LII, č.6, s.223-227
26. ZEMČÍK, L., DLOUHÝ, A. Metalurgie intermetalických slitin typu gama TiAl. In Sborník z konference *METAL 2003* [CD-ROM]. Ostrava: Tanger, 2003, s. 1-6
27. ZEMČÍK, L., DLOUHÝ, A., KRÓL, S. Vakuová metalurgie intermetalik TiAl. In *METAL 2005, 14. mez. konference metalurgie a materiálů*. Ostrava, TANGER Ostrava. 2005. p. 1 – 7. ISBN 80-86840-13-1.
28. HU, D., LORETTO, M. H., BLENKINSOP, P. A.: Microstructure and Mechanical Properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb-1B, In: COST 513 Annual Technical Report, ed. M.H. Loretto, T. Valente (Brussels, Belgium: European Commission, 1997), p. 61 – 66.
29. DLOUHÝ, A., KUCHAROVÁ, K., HORTEL, T.: Creep and Microstructure of Near-Gamma TiAl Intermetallics, In: *Materials for Advanced Power Engineering 1998*, Proceedings of the Sixth Liege Conference, part III, ed. Lecomte-Beckers, J. et al., (Jülich, Germany: Forschungszentrum Jülich, 1998), p. 1219 – 1228.
30. KOMOROVÁ L., IMRIŠ, I. *Termodynamika v hutnictví*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 296 s.
31. VÁLEK, R. Metalografie a studium mikrostruktury odlitků na bázi γ - TiAl. *Interní zpráva ÚFM AV ČR ke grantu 106/04/0853 z r. 2004*
32. GUO, J., LIU, G., SU, Y., DING, H., JIA, J., Fu, H. The critical Pressure and Impending Pressure of Al Evaporation during Induction Skull Melting Processing of TiAl. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Oct. 2002, Vol. 33A, p.3249-3253
33. DAS, K., CHOUDHURY, P., DAS, S. The Al-O-Ti (Aluminum-Oxygen-Titanium) System. *Journal of Phase Equilibria*. No. 6 2002, Vol. 23, p. 525-536

34. DLOUHÝ, A., ZEMČÍK, L. Optimalizace přesného lití intermetalických slitin na bázi sloučeniny gama TiAl. *Slévárství*. 2004. LII(6). p. 227 – 232. ISSN 0037-6825.