



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ODLITKY ZE SLITIN TIAL PRO TURBODMYCHADLA

CASTINGS FROM TIAL ALLOYS FOR THE TURBOCHARGERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Kudýn

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **David Kudýn**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

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 bakalářské práce:

Odlitky ze slitin TiAl pro turbodmychadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Slitiny TiAl jsou pro svou nízkou hustotu a zajímavé vysokoteplotní vlastnosti perspektivním konstrukčním materiálem pro turbínová kola plnicích turbodmychadel.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je odborná rešerše shrnující zkušenosti s výrobou a aplikací turbínových kol ze slitin TiAl.

Seznam doporučené literatury:

NODA, T. Application of cast gamma TiAl for automobiles. Intermetallics. 1998, 6(7-8), 709-713. ISSN 0966-9795.

LORIA, E. Quo vadis gamma titanium aluminide. Intermetallics. 2001, 9(12), 997-1001. ISSN 0966-9795.

LORIA, E. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials. Intermetallics. 2000, 8(9-11), 1339-1345. ISSN 0966-9795.

TETSUI, T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. Materials Science and Engineering: A. 2002, Volumes 329–331, 582-588. ISSN 0921-5093.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KUDÝN David: Odlitky ze slitin TiAl pro turbodmychadla.

Práce se zaměřuje na rozbor intermetalických slitin TiAl. Nejprve rozebírá jejich vlastnosti a jejich změny na základě jejich zpracování a ovlivňování legujícími prvky. Následně jsou zde uvedeny možnosti využití v praxi. Pozornost je soustředěna především na turbodmychadlová kola a jejich porovnání s konvenčními materiály. Dále jsou zde rozebrány jednotlivé způsoby tavení a odlévání a s nimi spojené materiály pro tavicí kelímky a formy. Na závěr se práce zabývá možnostmi recyklace zbytkového materiálu.

Klíčová slova: TiAl, turbodmychadla, odlitky, tavení, recyklace

ABSTRACT

KUDÝN David: Castings from TiAl alloys for the turbochargers.

The bachelor thesis is focused on the analysis of intermetallic alloys TiAl. First of all, it is analysed their properties and the way how they change depends on their treatment and influencing of alloying elements. Then ways of utilization in practice are stated here. Attention is concentrated especially on turbochargers wheel and their comparison to convention materials. After that individual options of melting and casting and materials for melting crucibles and moulds associated with them are there discussed. In the end, the thesis has analysed the ways of recycling of residual material.

Keywords: TiAl, turbochargers, castings, melting, recycling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUDÝN, David. *Odlitky ze slitin TiAl pro turbodmychadla* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. 36s, Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115971>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Zemčík.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 23.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Ladislavu Zemčíkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a své rodině za podporu během celého studia.

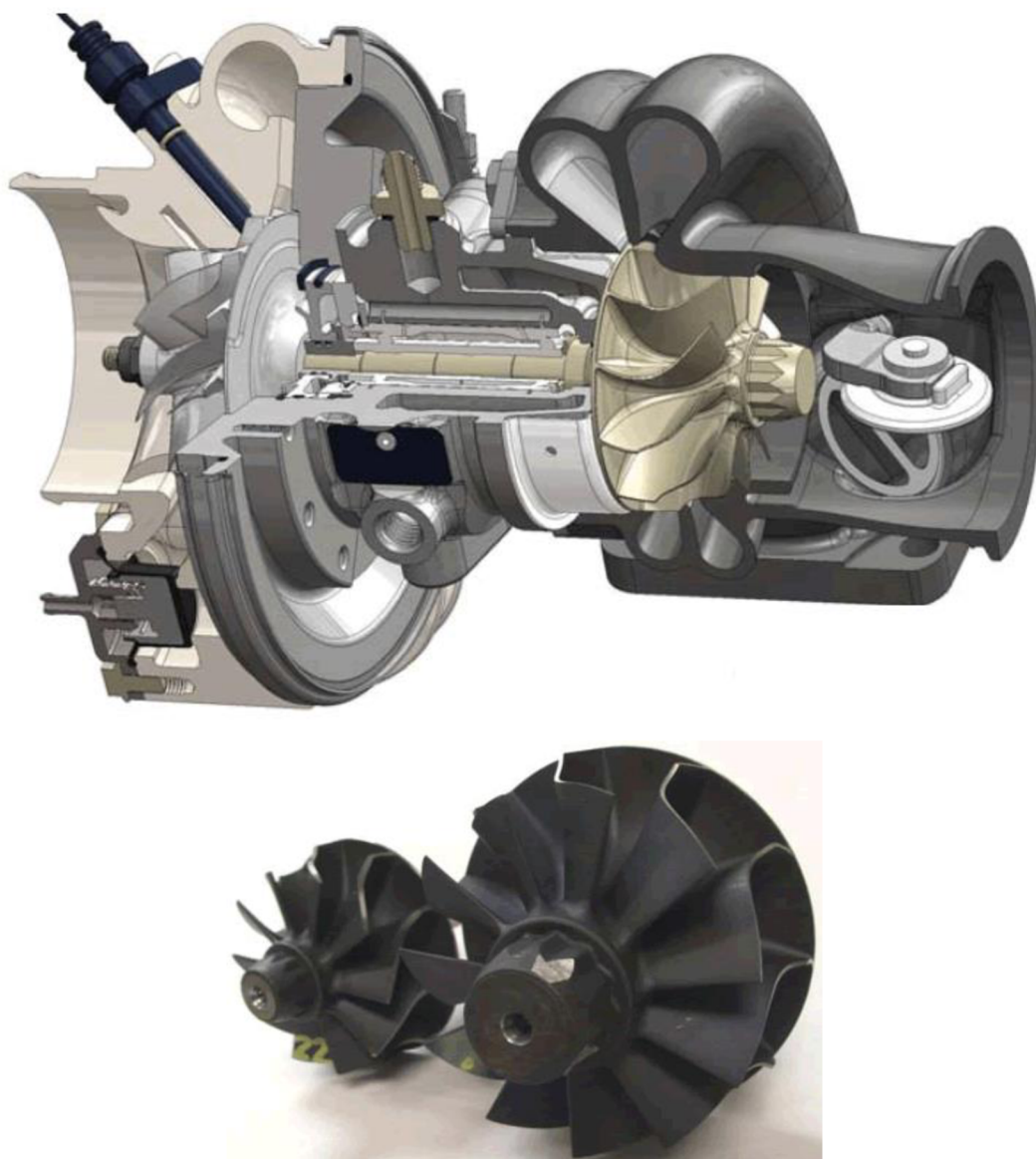
Obsah

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
ÚVOD	8
1 ROZBOR MATERIÁLU	9
1.1 Mikrostruktura	10
1.1.1 Vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti	12
1.2 Chemické složení	13
2 TITAN ALUMINIDY V PRAXI	15
2.1 Lopatky nízkotlakých stupňů u turbín	15
2.2 Aplikace v medicíně	15
2.3 Ventily spalovacích motorů	16
2.4 Turbodmychadlová kola	17
2.4.1 Ověřovací testy	18
2.4.2 Připojení kola k hřídeli	20
3 VÝROBA TiAl SLITIN	21
3.1 Tavení slitiny	22
3.1.1 Obloukové tavení ve vakuu (VAR)	22
3.1.2 Indukční tavení ve vakuu (VIM)	24
3.2 Odlévání slitiny	26
3.2.1 Antigravitační nízkotlaké lití ve vakuu	26
3.2.2 LEVICAST	26
3.2.3 Odstředivé odlévání	27
3.2.4 Formy	28
3.3 Recyklace	29
4 ZÁVĚR	31
Seznam použitých zdrojů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	

ÚVOD

TiAl slitiny získaly výraznou pozornost v posledních 20 letech pro své atraktivní vlastnosti spojené s jejich využitím při vysokých teplotách především v automobilovém a leteckém průmyslu, kde se využívají na součástky s rotačním, nebo vratným pohybem. V první řadě aplikace spadající v úvahu jsou lopatky leteckých turbín, výfukové ventily a turbínová kola turbodmychadel (obr. 1). Kvůli své vysoké pevnosti, nízké hustotě a dobré odolnosti proti tečení a oxidaci se staly hlavními kandidáty v nahrazování niklových superslitin v těchto součástech. Odhaduje se, že náhradou původního materiálu dojde k snížení hmotnosti v rozmezí 20-30 %, čímž dojde ke zlepšení výkonnosti a menšímu množství škodlivých částí ve výfukových plynech.^{[1],[2]}

V minulosti byla atraktivita vlastností TiAl slitin převážena překážkami spojenými s jejich zpracováním, které vedly především k vysoké ceně. Avšak vývoj v obráběcích procesech, získávání nových poznatků v oblasti mikrostruktury a pokrok v odlévání vedl k prvnímu komerčnímu využití těchto slitin ve Formuli 1 a dalších sportovních automobilech.^[3]

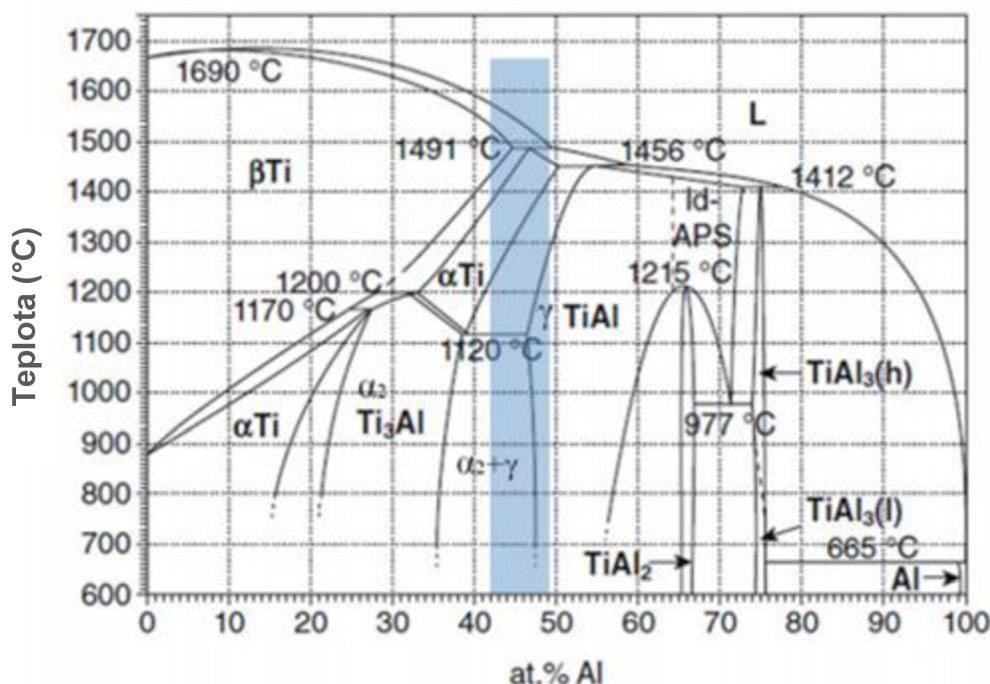


Obr. 1 Řez turbodmychadlem a TiAl turbodmychadlové kolo [4]

1 ROZBOR MATERIÁLU

Titan aluminidy patří mezi tzv. intermetaliky. Slitiny tohoto typu jsou formovány dvěma kovy, přičemž jejich krystalová struktura a vlastnosti se kompletně liší od původních kovů. Jsou obvykle formovány jen v úzkém rozsahu koncentrací, mají konkrétní chemické složení, kterým jsou charakterizovány a jejich atomy mají přesně určené uspořádání v krystalové mřížce. V poslední době se výzkum v této oblasti zaměřil na intermetalické materiály založené na niklu Ni_3Al a $NiAl$, založené na železe $FeAl$ a Fe_3Al , a právě na titanu založených intermetalikách Ti_3Al a $TiAl$.^{[1],[5]}

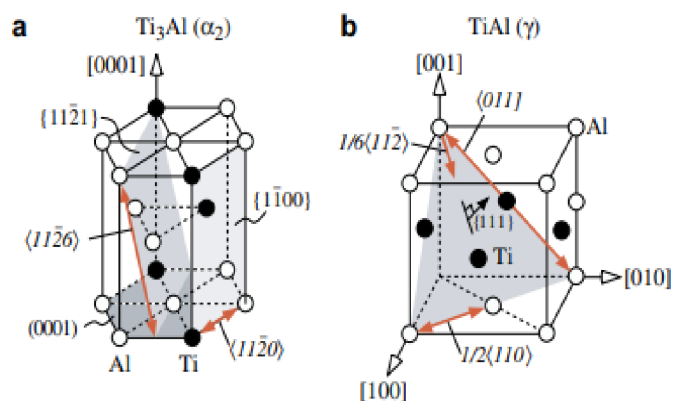
Tyto aluminidy mají specifické vlastnosti, které je činí atraktivními pro vysokoteplotní konstrukční aplikace. Obsahují dostatek hliníku, aby se v prostředí s obsahem kyslíku vytvořily tenké vrstvy oxidu hlinitého (Al_2O_3), které zvyšují odolnost proti oxidaci. To ovšem neplatí pro titan aluminidy, neboť ty jsou charakteristické svojí vysokou afinitou titanu ke kyslíku, a proto vytvářejí za vysokých teplot TiO_2 místo ochranného Al_2O_3 . Z tohoto důvodu je důležité zajistit jiným způsobem, např. legováním, zvyšování odolnosti proti oxidaci při zachování požadované odolnosti proti tečení a dostatečné pevnosti. Přesto ale mají titan aluminidy atraktivní vlastnosti oproti konvenčním slitinám titanu, protože dosahují nízké hustoty, relativně vysoké teploty tání a dobré pevnosti za vysoké teploty. Mimo tyto pozitivní vlastnosti mají intermetaliky $TiAl$ sklon ke křehkému lomu a nízké tažnosti při pokojové teplotě. Titan aluminidy se vyskytují v několika fázích (obr. 2), z nichž svými vlastnostmi z hlediska konstrukce jsou nejzajímavějšími.^{[5],[6]}



Obr. 2 Ti-Al fázový diagram [6]

- Ti_3Al (α_2) má, jak je vidět na fázovém diagramu Ti-Al (obr. 2), široký rozsah stability, s obsahem hliníku od 22 do 39 at.%. Krystalizuje ve struktuře podobné hexagonální mřížce (DO_{19}) (obr. 3a). Sloučenina je zcela narušena při teplotě 1180 °C a 32 at.% obsahu hliníku. Využívané polokomerční a experimentální α_2 slitiny jsou dvoufázové, tj. složené z $\alpha_2 + \beta/\beta_2$ s obsahem 23 až 25 at.% hliníku a příměsí niobu od 11 %. Vliv niobu bude popsán později v této práci.^{[1],[5]}

- TiAl (γ) má plošně středěnou tetragonální strukturu L_{10} (obr. 3b), která má široký rozsah stability od 49 do 66 at.% v závislosti na teplotě. Gama fáze zůstává uspořádaná až do teploty tání, která se pohybuje okolo 1450 °C. Jelikož se mezi atomy titanu a hliníku vytváří silná vazba, dochází ke vzniku vysoké aktivační energie pro difuzi, čímž vzniká energetická bariéra, která pomáhá udržet pevnost a odolnost proti tečení i za vysokých teplot. Dále pak pomáhá zachovat vysokou tuhost i při velkém rozsahu teplot. Nicméně tato pevná vazba omezuje schopnost přizpůsobit se plastické deformaci, takže podobně jako u ostatních intermetalických sloučenin, postrádá gama fáze tažnost a houževnatost. V tabulce 1 jsou přehledně porovnány konvenční Ti-Al slitiny spolu s intermetalickými a niklovými superslitinami.^{[1],[5],[7]}



Obr. 3 Krystal. struk. a) $Ti_3Al (\alpha_2)$ b) $TiAl (\gamma)$ [7]

Tab. 1 Porovnání Ti-Al slitin se slitinami na intermetalické bázi za pokojové teploty. [1],[5]

Vlastnost	Běžné Ti-Al slitiny	$Ti_3Al (\alpha_2)$	$TiAl (\gamma)$	Ni slitiny
Hustota [$g \cdot cm^{-3}$]	4,5	4,1-4,7	3,7-3,9	8,3
Youngův modul [GPa]	96-100	100-145	160-176	206
Mez kluzu [MPa]	380-1150	700-990	400-650	1000
Pevnost v tahu [MPa]	480-1200	800-1140	450-800	1200
Limit tečení [°C]	600	760	1000	1090
Limit oxidace [°C]	600	650	900	1090
Tažnost za pokoj. teploty [%]	20	2-10	1-4	3-5
Tažnost za vysokých teplot [%]	Vysoká	10-20	10-60	10-20

Dle vlastností popsaných výše je zřejmé, že ani jedna z fází sama o sobě nevykazuje optimální vlastnosti pro konstrukční využití, proto se využívá jejich kombinace, která obsahuje 80-98% γ fáze, přičemž zastoupení hliníku je v rozsahu od 40 do 48 at.%. Díky legování je reálné dosáhnout u této duální fáze tažnosti kolem 6 % za pokojové teploty, přičemž vykazuje dobrou pevnost jak za pokojové, tak vysoké teploty. Odolnost proti oxidaci a tečení je dostatečná do 850 °C. Při porovnání niklových superslitin s TiAl lze pozorovat především výrazný rozdíl v hustotě, která je zhruba poloviční. Problém ale nastává v ceně, která se může vyšplhat až na desetinásobky.^[8]

1.1 Mikrostruktura

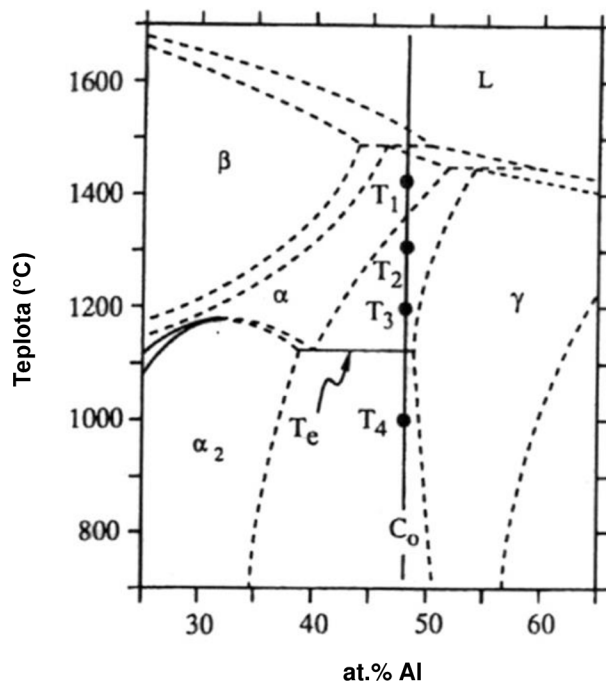
V závislosti na tepelném zpracování se rozlišuje široká škála typů mikrostruktury duální fáze. Jsou rozděleny do čtyř kategorií, jmenovitě téměř gama (γ), duplexní, téměř lamelární a plně lamelární.^{[1],[9]}

Plně lamelární struktura (obr. 5a) je získána při rychlém ochlazování z teploty T_1 (obr. 4) na pokojovou teplotu v čisté α fázi, přičemž dochází k precipitaci α fáze v pláty α_2 a γ pláty dále formují plně lamelární morfologii. Tato mikrostruktura je tvořena zrný v rozsahu od 200 μm do 1000 μm .^[1]

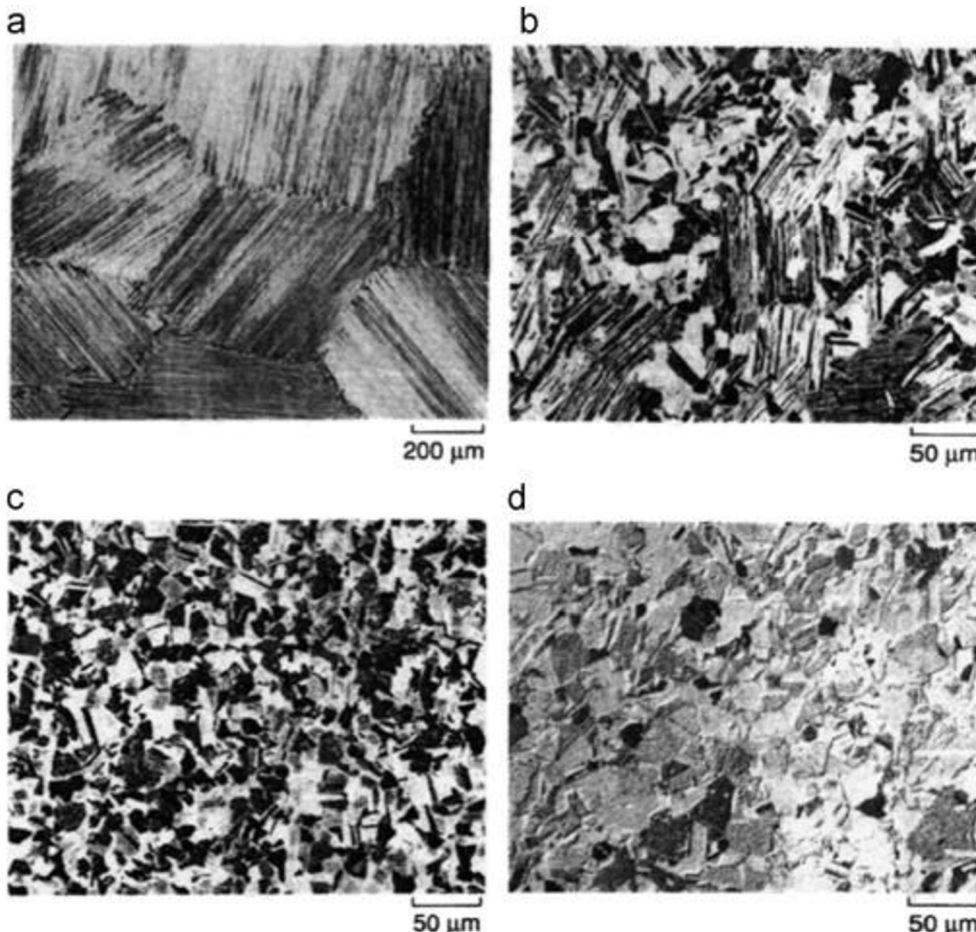
Téměř lamelární struktura (obr. 5b) se formuje při lehce pomalejším ochlazování z teploty T_2 (obr. 4) v oblasti $\alpha + \gamma$ fáze, kde poměr α/γ je větší než 1, což způsobuje převahu lamelární kolonie nad γ zrn, jejichž velikost se pohybuje mezi 150 μm až 200 μm .^{[1],[8]}

Duplexní mikrostruktura (obr. 5c) vzniká při tepelném zpracování v $\alpha + \gamma$ fázi při teplotě T_3 (obr. 4), kde množstevní poměr α/γ je rovný 1. Je složena ze zrn lamelární struktury a γ zrn. Lamelární zrna obsahují střídající se α_2 a γ pláty, které vznikají v důsledku transformace z primárního α během chlazení na pokojovou teplotu. Smíšením těchto dvou morfologií je dosaženo velmi jemné mikrostruktury s průměrnou velikostí zrna okolo 10 μm .^{[1],[8],[5]}

Posledním typem je téměř-gama mikrostruktura (obr. 5d), která vzniká za ochlazování z podstatně nižší teploty T_4 (obr. 4) ve fázi $\alpha_2 + \gamma$. Skládá se z gama zrn s α_2 fází tvořící se na hraních zrn.^[1]



Obr. 4 Část Ti-Al fázového diagramu [1]



Obr. 5 Mikrostruktura duální fáze [1]

1.1.1 Vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti

- Tažnost u duplexní mikrostruktury tvořené jemnozrnnou lamelární kolonií a γ -zrny dosahuje nejlepší tažnosti. Obecně lze říci, že tažnost je ovlivněna čtyřmi základními faktory: velikostí zrna, množstvím nečistot, poměrem lamelární struktury a γ -fáze (tzv. L/γ poměrem) a změnami v rozměrech mřížky. Mezi velikostí zrna a tažností v podstatě platí nepřímá úměra, tedy čím je velikost zrna menší, tím má materiál lepší tažnost. To je způsobeno tím, že při zmenšení zrna stoupá množství poruch (hranic zrn), což pomáhá deformačním mechanismům. Nejvhodnější L/γ poměr je v rozmezí 0,3-0,4, při kterém je zajištěna maximální tažnost. Ten je dále závislý na α_2/γ , který vykazuje maximální tažnost v rozsahu od 3 do 15 %. Všechny tyto faktory jsou v podstatě ovlivněny koncentrací hliníku, která je optimální okolo 48 %. Dále, např. při snížení obsahu kyslíku z 800 ppm (částic na jeden milion) na 370 ppm, došlo ke zvýšení tažnosti z 2 na 2,7%.^[1]
- Odolnost proti tečení v duální fázi je především ovlivněna přítomností hliníku, zvýšení jeho zastoupení ve slitině zpravidla vede i ke zvýšení odolnosti. Dalším podstatným faktorem je typ mikrostruktury. Plně lamelární struktura s hrubým zrnem vykazuje lepší odolnost proti tečení než jemnozrnná duplexní struktura. Pravděpodobně je to způsobeno množstvím α_2 fáze, která působí jako výztuž. Z hlediska mikrostruktury je podstatná teplota 650 °C. Do této teploty dosahuje lepší hodnoty duplexní mikrostruktura, následně už je lepší výše zmíněna plně lamelární struktura.^[1]
- Únavovou životnost ovlivňují stejné faktory jako ty u odolnosti proti tečení. Duplexní struktura, spojená s jemnozrnností, zvyšuje únavovou životnost až do 800 °C, poté ale podléhá vyšší míře růstu únavových trhlin oproti plně lamelární mikrostruktuře.^[1]
- Lomová pevnost se pohybuje v rozmezí od 10 MPa · m^{1/2} do 16 MPa · m^{1/2} pro duplexní mikrostrukturu. Plně lamelární struktura dosahuje vyšších hodnot a to až do 30 MPa · m^{1/2}. Při detailním zkoumání bylo zjištěno, že duplexní mikrostruktura je doprovázena malou plastickou deformací v okolí čela trhliny a žádnou ochranou proti jejímu následnému šíření, zatímco lamelární struktura získává velkou plastickou deformaci ve špičce trhliny a zvýšené ochraně proti dalšímu šíření.^[1]
- Pevnost v tahu duální fáze titan aluminidů je nepřímo úměrná velikosti zrna. Vzhledem k hrubosti zrna v plně lamelární mikrostruktuře je dosaženo nižší pevnosti v porovnání s duplexní mikrostrukturou. Pozorováním byla zjištěna určitá anomálie v chování materiálu při vyšších teplotách, kdy dochází ke zvyšování pevnosti do určitého bodu a poté k jejímu snižování. Toto chování je specifické pro intermetaliky a dochází k němu z důvodu rozsáhlému uspořádání atomů.^[1]

Jak je vidět, mechanické vlastnosti duální fáze jsou velmi citlivé na morfologii mikrostruktury. Duplexní struktura vykazuje dobrou tažnost a pevnost za pokojové teploty, avšak pro vlastnosti spojené s vyššími teplotami jako tečení je vhodnější lamelární struktura. Její nízkou tažnost při pokojové teplotě lze zvýšit zjemněním zrna.^[1]

1.2 Chemické složení

Jak už bylo zmíněno výše, optimální obsah hliníku v duální slitině se pohybuje okolo 48 at.% především z důvodu nízké tažnosti při překročení této hranice. V posledních letech se výzkum zaměřil na vývoj v rozmezí 44 až 48 at.% hliníku, ačkoliv pro aplikace v prostředí s vyššími teplotami se zkoumají slitiny s obsahem do 42 at.%. Jak je vidět na obr. 6, při snížení obsahu hliníku je rozšířena β fáze, která je lépe zpracovatelná za tepla. Pokud tedy nejsou požadovány perfektní vlastnosti za tepla, je to jedna z možností, jak snížit náklady na zpracování.^[10]

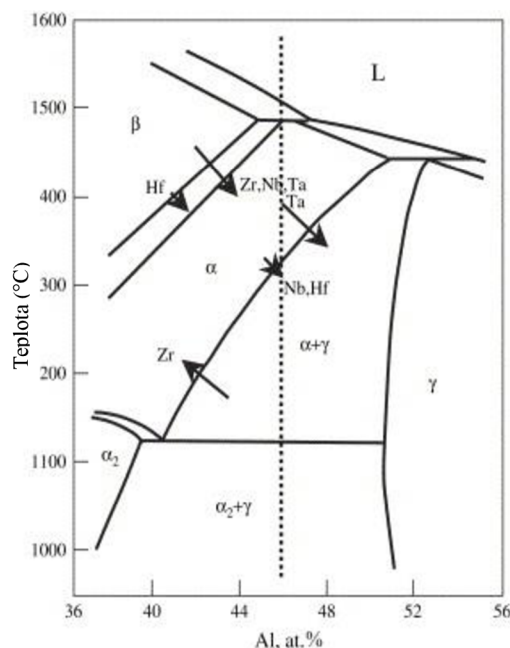
Protože ale většina aplikací titan aluminidů je založená především na dobré pevnosti za vyšších teplot, není snížení obsahu hliníku správné řešení. Jedna z cest, jak dosáhnout požadovaných vlastností, je legování. Množství jednotlivých prvků se pohybuje okolo 1-3 % až na výjimky jakou je například niob. Přičemž účinky jsou různé v závislosti na jednotlivých ternárních fázových diagramech. Jejich obecný vliv je zachycen v tabulce 2.^[1]

Tab.2 Vliv jednotlivých legujících prvků. [1]

Prvek	Efekt
Nb	Zvyšuje odolnost proti oxidaci a tečení a odolnost za vysokých teplot
Ta	Zvyšuje odolnost proti oxidaci a tečení, ale i tendenci pro hot cracking
V	Zvyšuje tažnost
W	Zvyšuje odolnost proti oxidaci a tečení
B	Zjemňuje zrna
C	Zvyšuje odolnost proti oxidaci a tečení
Cr	Zvyšuje tažnost při malém množství a zvyšuje odolnost proti oxidaci a tečení při větších množstvích
Mn	Zvyšuje tažnost
Mo	Zvyšuje pevnost a odolnost proti oxidaci a tečení

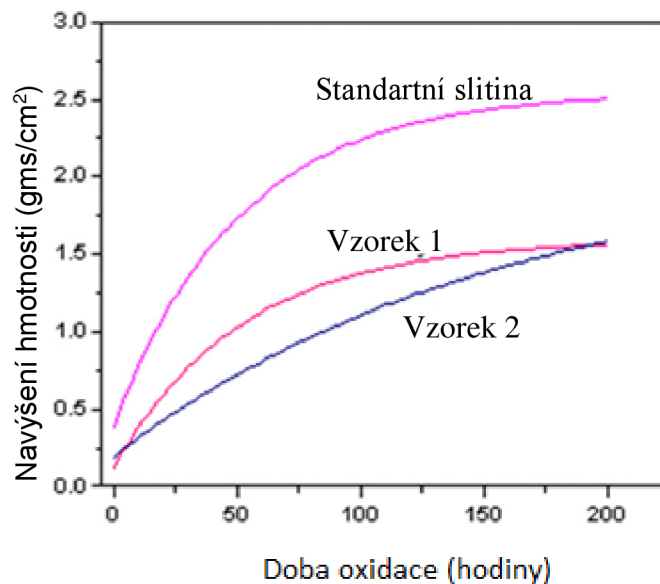
Za velmi podstatný legující prvek je považován niob (Nb), který patří do tzv. β fázi stabilizujících prvků (obr. 6), zvyšuje odolnost proti oxidaci (obr. 7) a tečení, jak už bylo uvedeno v tabulce 2. Mimo to zvyšuje i pevnost za vysokých teplot. Toto zpevnování je způsobeno při nahrazování atomů titanu niobem a snižováním obsahu hliníku v gama fázi. Což následně vede k posunu hranice alfa fáze doleva a snižuje teplotu potřebnou k dosažení plně lamelární struktury. Snižováním této teploty může být kontrolována velikost zrna, a tedy dosažení jemnější struktury a tím lepší tvrdosti.^[11]

Pro posouzení účinku Nb na oxidační chování slitin TiAl byl proveden experiment pro tři slitiny Ti-45Al-7,5Nb-2Cr-0,3B (vzorek 1), Ti-45Al-10Nb-2Cr-0,3B (vzorek 2) a standardní Ti-48Al-2Nb-2Cr. Tyto vzorky byly roztaveny ve vakuové obloukové peci. Poté byly odlitky hipovány v ochranné atmosféře argonu pod tlakem 120 MPa a teplotě 1230 °C po dobu 4 hodin a následně se nechaly pomalu ochladit. Tavení bylo provedeno šestkrát, aby byla zajištěna chemická homogenita. Vzorky o tloušťce 3 mm a průměru 100 mm byly následně odřezávány z ingotů pomocí vysokorychlostní pily.^{[11],[12]}



Obr. 6 Částečný Ti-Al diagram [10]

Celý test izotermické oxidace byl prováděn v peci za teploty 900 °C a atmosférického tlaku pro různě dlouhé intervaly a to od 5 do 200 hodin. Poté byly vzorky ochlazeny na pokojovou teplotu a následně zváženy. Výsledky je možné vidět na obrázku 7. Z grafu je patrné, že navýšení hmotnosti, které je způsobeno pohlcení oxidu, je největší pro standartní slitinu a nejnižší pro slitinu dvě, tedy tu s největším obsahem niobu. Tyto výsledky potvrzují pozitivní vliv niobu na odolnost proti oxidaci.^{[11], [12]}



Obr. 7 Výsledky oxidačního testu [11]

2 TITAN ALUMINIDY V PRAXI

Jak už bylo zmíněno, aplikace titan aluminidů je zaměřena především na letecký a automobilový průmysl. Jejich potencial se jako první pokusily využít firmy Rolls Royce, P&W a GE. Mimo to lze jejich využití najít například ve zdravotnictví, kde se využívají na implantáty a nástroje.^[5]

2.1 Lopatky nízkotlakých stupňů u turbín

V roce 2011 nadnárodní konglomerát General Electric uvedl do provozu nový motor Genx – 1B (obr. 8), který pohání letadlo Boeing 787 Dreamliner. Lopatky nízkotlaké turbíny v tomto motoru jsou odlity z gama titan aluminidů, přesněji řečeno ze slitiny Ti-48Al-2Cr-2Nb. Využívají se především kvůli své nízké hustotě, na základě které se snižuje odstředivá síla, která působí na rotor, čímž klesá napětí. Což následně umožňuje použití menšího disku u věnce rotoru než u konvenční vysokolegované oceli. Tyto lopatky mají nominální prodloužení za pokojové teploty přibližně do 2 % a dobrou odolnost proti vlivům od spalin, takže nepotřebují žádné krytí pro aplikace zhruba do 800 °C.^{[5] [13],[14]}

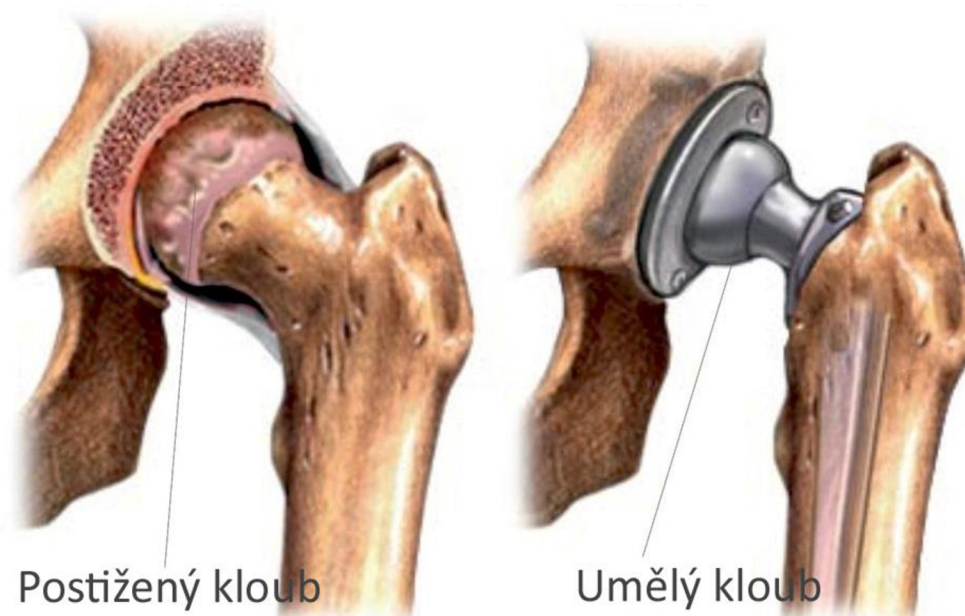


Obr. 8 Turbína Genx-1B a TiAl lopatka [13],[14]

2.2 Aplikace v medicíně

Mimo automobilový a letecký průmysl mají titan aluminidy široké využití i v oblasti medicíny, kde díky své odolnosti proti korozi, biologické kompatibilitě a přirozené schopnosti připojit se k lidské kosti, slouží na výrobu implantátů ramenních nebo kyčelních kloubů (obr. 9), zubních náhrad, popřípadě chirurgických nástrojů. Avšak přestože má titan výbornou biokompatibilitu, má určité rozdíly v mechanických vlastnostech oproti přírodním kostem. Mezi tyto rozdíly patří například vysoký Youngův modul pružnosti, který způsobuje tzv. stínění, při kterém dochází ke slábnutí kosti vlivem menšího zatížení a následnému selhání. Dalším problémem je, že povrch umělé kosti je nutné upravit pro zlepšení tribologických vlastností. Takový povrch musí být porézni, čímž dojde ke snížení Youngova modulu pružnosti, aby se předešlo stínění. Na druhou stranu při vysoké pórovitosti vykazují tyto implantáty nižší pevnost v porovnání s kortikálními kostmi. Poslední studie ukazují, že nejvhodnějších vlastností dosahují titan aluminiové kosti v případě 60-70 % pórovitosti.^[15]

Pro dosažení přesně požadovaných vlastností, bylo navrženo rozmanité množství metod a procesů, mezi které patří i vytvoření kompozitu spolu se sekundárním materiálem. Vzniklo mnoho výzkumů zabývajících se kompozitem hydroxylapatitem titaničitým, který vykazuje výborné vlastnosti spolu i s dobrou biokompatibilitou. Další možností je začlenění wollastonitu (CaSiO_3), který se používá pro zlepšení biokompatibility jakožto obal, spolu se slitinou Ti-6Al-4V (nejpoužívanější slitina titanu v medicíně).^[16]

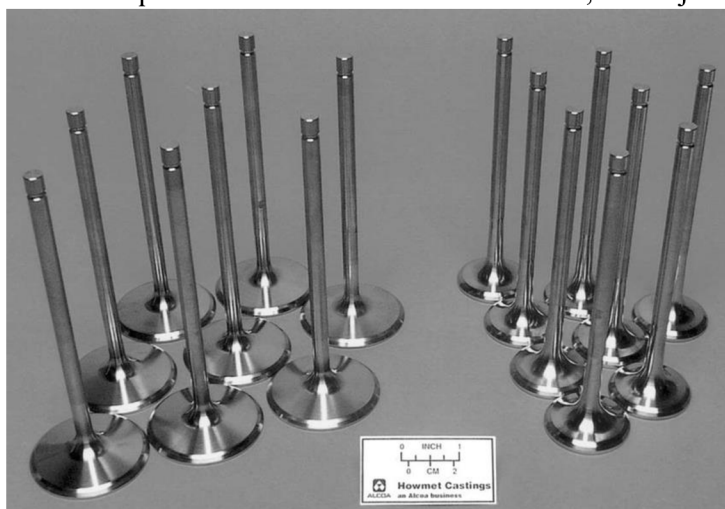


Obr. 9 Náhrada kyčelního kloubu [17]

2.3 Ventily spalovacích motorů

Mezi další uvažované aplikace patří jak výfukové (obr. 10), tak sací ventily spalovacích motorů pro automobily. Sací ventily dosahují v provozu teplot kolem $600\text{ }^\circ\text{C}$ a výfukové ventily se mohou dostat až nad teplotu $800\text{ }^\circ\text{C}$. Jelikož sací ventily nepracují v tak náročných podmínkách, není aplikace titan aluminidů přímo nutná a stačí na ně klasická titanová slitina. Oproti tomu u výfukových ventilů se naskýtá opravdová příležitost na nahrazení původních ocelí a niklových superslitin, které se využívají ve vysoko výkonnostních motorech.^[5]

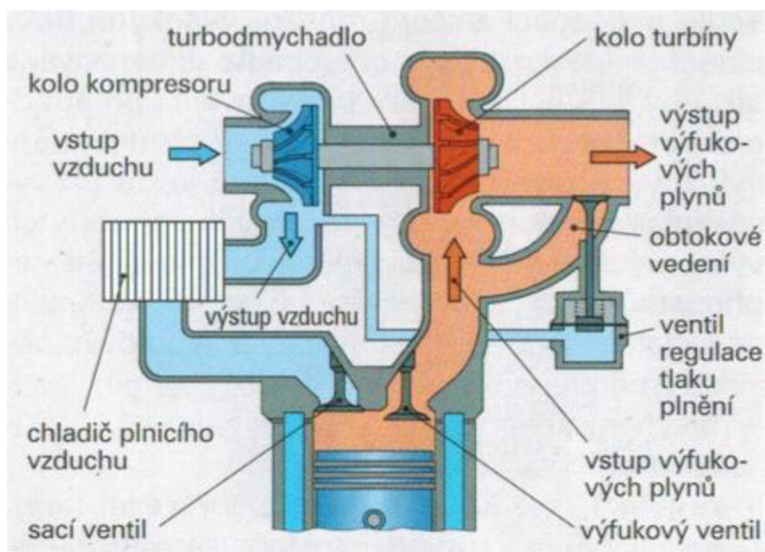
Rychlost motorových ventilů je limitována převážně hmotností sacích ventilů, které jsou větší než výfukové. Z tohoto důvodu může aplikace gama titan aluminidů vést ke zlepšení výkonu motoru, i když z hlediska vlastností postačují titanové slitiny. V porovnání s ocelovými ventily, gama titan aluminidy nabízejí výrazné snížení hmotnosti a to okolo 49 %. Ačkoliv i keramické ventily ze silikonu nitridu nabízejí úsporu až 57 % z původní hmotnosti, vyskytují se u nich problémy s vysokou cenou výroby a přirozenou křehkostí.^{[5],[18]}



Obr. 10 Odlité ventily z γ -TiAl [18]

2.4 Turbodmychadlová kola

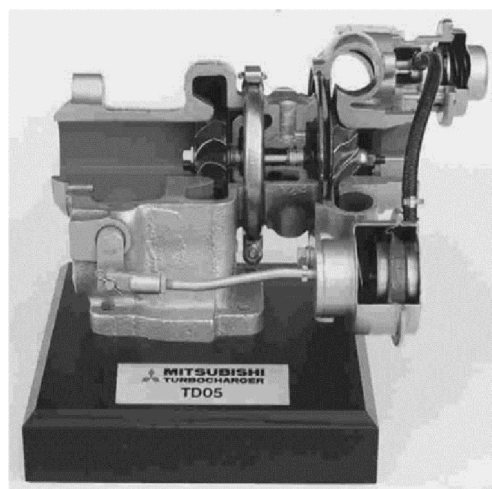
Na obrázku 11 je zobrazeno schéma popisující funkci turbodmychadla. Je to zařízení, ve kterém tepelná energie z výfukových plynů motoru roztáčí turbínu spolu s kompresorem, které jsou na stejné hřídeli, čímž se přitékající vzduch potřebný pro spalování stlačuje, což vede ze zlepšení spalování. Zaměření se na vývoj nových materiálů pro turbodmychadla dieselových motorů byl způsoben především neustálým zpříšňováním limitů pro množství vypuštěných nečistot spolu s výfukovými plyny, ale samozřejmě i pro zlepšení jízdních vlastností.^{[2],[3],[19]}



Obr. 11 Schéma turbodmychadla [19]

Nejjednodušší cestou ke zlepšení odezvy a akcelerace je snížením hmotnosti u rotačních součástí, čímž dojde i ke snížení momentu setrvačnosti. Pro představu v porovnání s konvenčním Inconelem 713C, který má hustotu $8000\text{--}8300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, dosahuje titan aluminiová slitina více než poloviční hustoty. Je ovšem nutné, aby tento materiál dosahoval i dobré teplotní odolnosti kvůli vysokým procesním teplotám, neboť výfukové plyny, které protékají přes kolo, dosahují více než $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.^{[2],[3]}

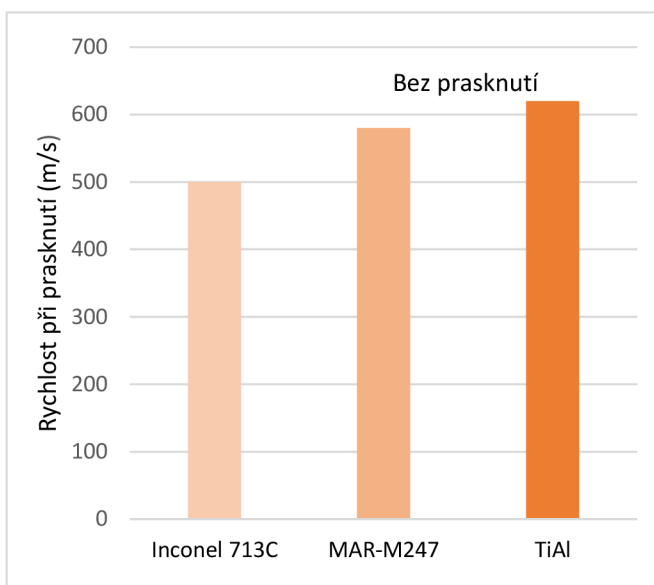
Tato titan aluminiová turbodmychadlová kola našla první využití v turbodmychadlech TD05, která byla využívána v sérii automobilů Lancer Evolution (obr. 12) od společnosti Mitsubishi Motors Corp., které byly uvedeny na trh v lednu 1999. Jejich prodeje dosáhly zhruba 5000 jednotek. Toto turbodmychadlo bylo mimo jiné obsaženo v autě, které vyhrálo mistrovství světa v rallye v tom stejném roce. V dřívější době byly využívány i pro vozy ve formuli 1.^[3]



Obr. 12 Lancer Evolution VI a turbodmychadlo TD05 [3]

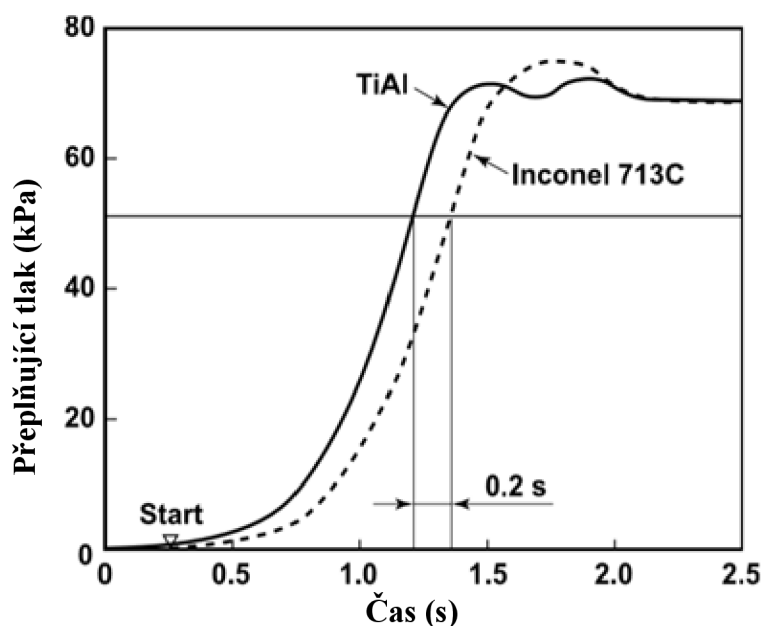
2.4.1 Ověřovací testy

- Test otáček při vysokých teplotách probíhá za vstupní teploty 1000 °C. Pro porovnání byly použity dva materiály: Inconel 713C (široce využívaný materiál pro turbodmychadla) a MAR-M247 (speciální materiál využívaný v závodních automobilech). Díky výborné pevnosti při vysokých teplotách, nedošlo u kola z TiAl slitiny k prasknutí ani při překročení rychlosti 600 m · s⁻¹ (obr. 13a). Tyto výsledky dávají možnost do budoucna, dosáhnout lepší účinnosti a využití většího průměru kola, než bylo možné při použití konvenčních materiálů.^[3]
- Test odezvy porovnává rychlost odezvy klasického turbodmychadla s turbínovým kolem z Inconelu 713C



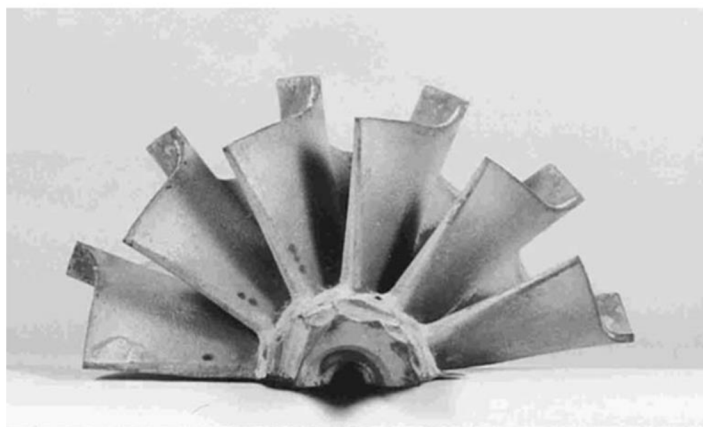
Obr. 13 Test otáček při vysokých teplotách [3]

a nového turbodmychadla s turbínovým kolem z TiAl slitiny, kdy cílem pozorování je čas potřebný k dosažení 100 000 resp. 170 000 ot/min. Při procentuálním srovnání výsledků obou turbodmychadel lze konstatovat, že turbodmychadlo s TiAl kolem dosáhne požadovaných otáček z volnoběhu o 16% resp. o 26% rychleji než to s kolem z Inconelu 713C. Dle grafu na obrázku 14 je dále patrné, že nové turbodmychadlo vykazuje o 0,2 sekund snížení času potřebného pro dosažení požadovaného přeplynujícího tlaku (50 kPa). Tento výsledek jasně demonstruje efekt při snížení hmotnosti turbínového kola. Už tento rozdíl může samotný řidič při jízdě pocitově zaznamenat. Došlo tedy k potvrzení předpokladu, že využitím intermetalik TiAl dojde ke zlepšení jízdních vlastností.^{[2],[3]}



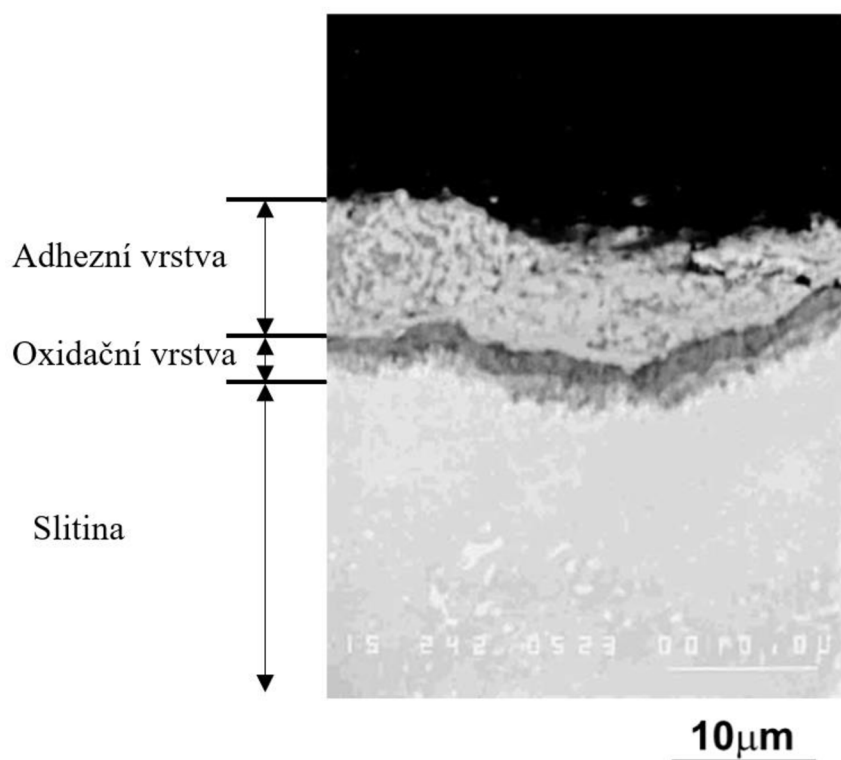
Obr. 14 Test rychlosti odezvy [3]

- Test v zážehovém motoru se provádí za trvalého zatížení a zrychlení/zpomalení při teplotě 900 °C a vyšší. Tyto zkušební podmínky jsou mnohem náročnější než jakékoliv klasické provozní zatížení. Na obrázku 15 je zobrazen vnější vzhled turbínového kola po provedeném testování. Nebyly nalezeny žádné deformace tvaru nebo defekty



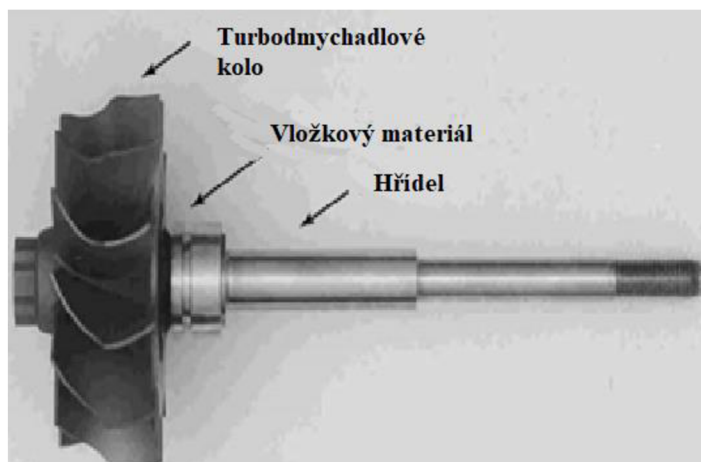
Obr. 15 Vzhled turbíny po testu v motoru [3]

Jedinou změnou tedy byla přeměna na bělavou barvu, která ale nemá žádný vliv na funkčnost. Přesný důvod této změny není jasný, předpokládá se, že je to způsobeno více prvky (Ca, Zn, P a Fe) a pravděpodobně tím dochází ke stabilizaci vrstvy Al_2O_3 , čímž dochází ke zlepšení oxidačního chování. Při detailní kontrole pomocí mikroskopu je možné pozorovat nově vzniklou adhezni a oxidační vrstvu. V adhezni vrstvě se vyskytují právě prvky, které způsobují zblednutí povrchu. Z obrázku 16 je dále vidět, že oxidační vrstva je oproti adhezni výrazně tenčí. To potvrzuje velmi dobrou odolnost proti oxidaci.^[3]



Obr. 16 Detail povrchu po testu [3]

2.4.2 Připojení kola k hřídeli



Obr. 17 Ukázka spoje TiAl s ocelovou hřídelí [3]

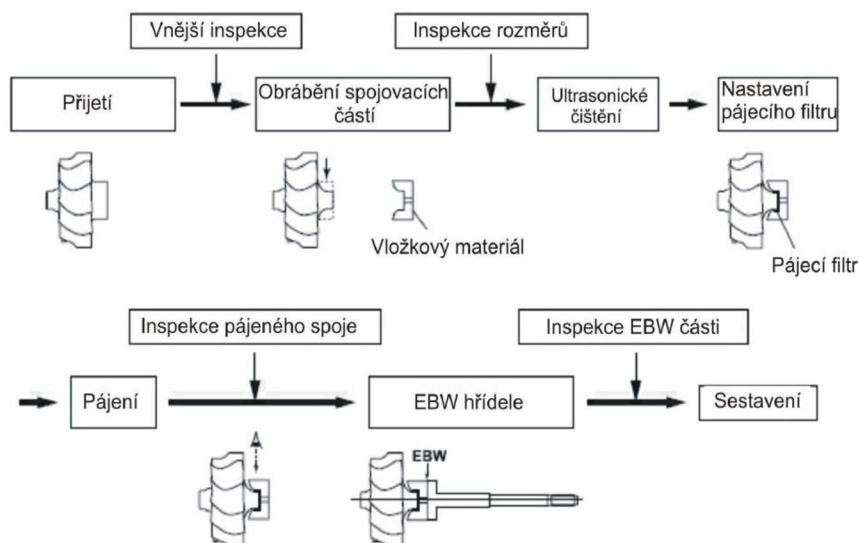
U běžných turbodmychadel se obvykle ocelové hřídele spojují s turbínovými koly frikčním svařováním nebo svařováním elektronovým paprskem. Tyto konvenční způsoby spojování ale nelze aplikovat na přímé spojování TiAl a martenzitických ocelí z důvodu výrazných rozdílů lineárních koeficientů roztažnosti mezi ocelí a TiAl. To má za následek zhoršenou kvalitu spoje za zvýšených teplot, které jsou charakteristické pro provozní podmínky turbodmychadel. Pro řešení tohoto problému je tedy

nutné použít výplňový materiál s podobným lineárním koeficientem roztažnosti jako má TiAl (obr.17). Mezi materiály s podobnou roztažností patří například čisté stříbro nebo jeho slitiny s mědí a titanem. Následné spojení mezi kolem z TiAl a vločkovým materiálem je provedeno pájením natvrdo a poté spoj mezi ocelovým hřídelem a kolem s přídavným materiálem je vytvořen za použití běžného EBW neboli svařování elektronovým paprskem.^{[2],[3]}

Komplikovanějším procesem z obou spojovacích technologií je pájení natvrdo, pro které dříve neexistovaly metody, které by byly schopny zajistit dostatečnou spolehlivost při masové výrobě. V reakci na to byly provedeny výzkumy, které se zabývaly konstrukcí spojované části, materiály vhodnými pro vložku a podmínkami pájení. Toto bádání vedlo k vývoji vysoce spolehlivé technologie pájení s minimem závad a dostatečnou pevností v celém teplotním rozsahu.^[3]

Jednou z technologií, která dosahuje uspokojivého přímého spojení těchto materiálů, je vakuové pájení. Kvalita spoje je přitom zajištěna pájecím materiálem, který plní úlohu tlumiče napětí. Problémem této metody je vysoká cena, již u tak velmi nákladného procesu výroby.^[2]

Pro dosažení nákladově efektivního spoje mezi TiAl a ocelí se používá metoda indukčního pájení. Výhodou této metody je krátký spojovací cyklus. Po vložení výplňového materiálu pod mírným tlakem mezi TiAl slitinu a ocel se poloha spoje rychle zahřeje a udržuje se na pájecí teplotě v ochranné atmosféře argonu, aby se zabránilo oxidaci. Na obr. 18 je zobrazen proces vytvoření celého spojení.^{[2],[3]}

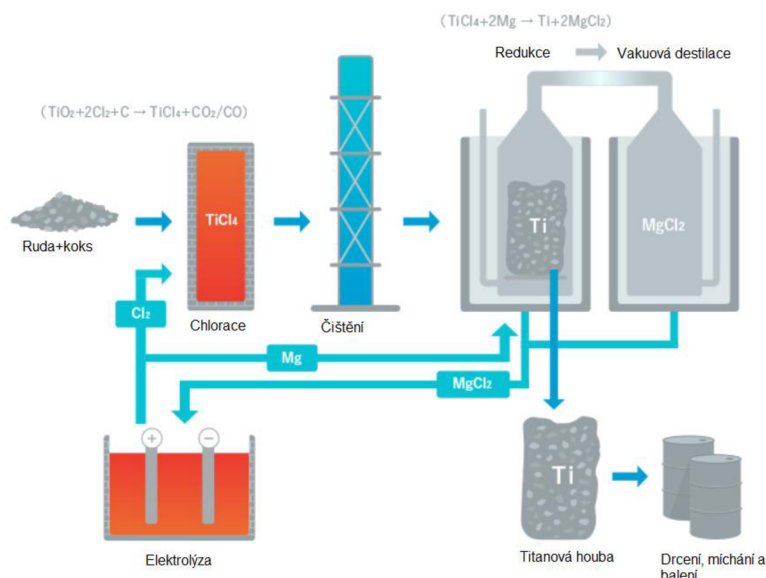


Obr. 18 Připojení kola k hřídeli [3]

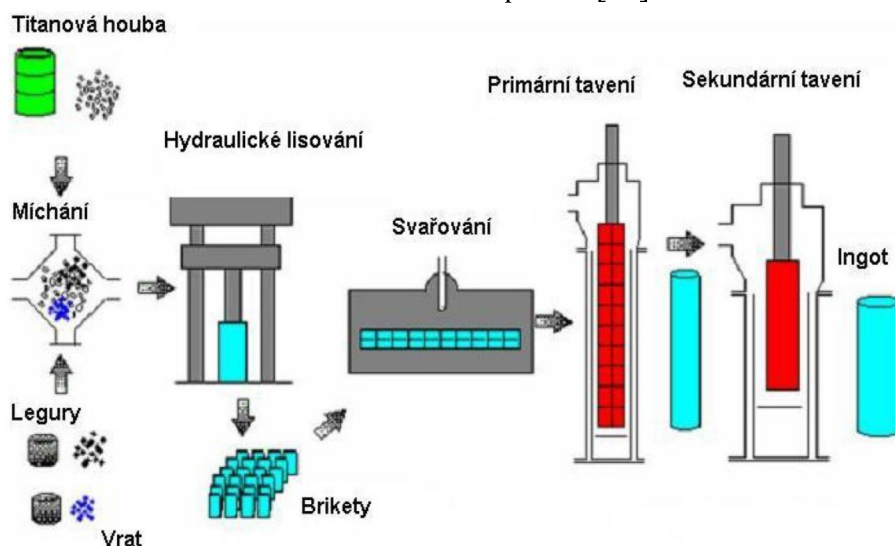
3 VÝROBA TiAl SLITIN

Výroba titanových produktů je neustále spojena s vysokou cenou. Proto metody jako protlačování nebo kování nejsou příliš vhodné. Z toho důvodu se nejvíce využívají různé metody odlévání.^[20]

Základem titanových produktů ve všech průmyslových odvětvích je titanová houba spolu s menším množstvím recyklovaného materiálu. Titanová houba se zpracovává pomocí Krollova procesu (obr.19), který pracuje na principu redukce chloridu Ti hořčíkem. Problémem je podstatné znečištění především chloridy, pro jejich odstranění je nutné provádět finální přetavení vícekrát. Proces výroby primárního ingotu začíná zhutněním titanové houby v hydraulickém lisu, poté jsou tyto výlisky spojeny do elektrody pro tavicí proces. Pokud je požadované specifické složení slitiny, jsou přidány legující prvky, které se smíchají s titanovou houbou ještě před lisováním. Následně jsou výlisky svařeny do finální odtavné elektrody. Je nutné, aby svařování probíhalo v ochranné atmosféře argonu a za nízkého tlaku, kvůli vysoké afinitě titanu ke kyslíku. Elektroda je následně přetavená pomocí technologie VAR, čímž vznikne primární ingot. Pro vytvoření homogenního chemického složení se tento ingot přetaví ještě jednou.^[20]



Obr. 20 Krollův proces [21]



Obr. 19 Výroba primárního ingotu [22]

3.1 Tavení slitiny

Zásadní problém při zpracování TiAl tavením spočívá v jejich vysoké reaktivnosti s plyny vyskytujícími se ve vzduchu (kyslík a dusík). Aby tedy nedošlo ke znečištění, musí být tyto slitiny taveny, odlévány a ochlazovány pouze ve vakuu nebo v inertní atmosféře. Mimo to reagují i s konvenčními materiály používanými pro výrobu kelímku. Proto musí být taveny v měděných kelímcích chlazených vodou, nebo v kelímcích keramických. Při tavení v měděných kelímcích se pak vyskytují výrazná bezpečnostní rizika spojená s vysokou tavící teplotou. Už při porovnání těchto teplot, kdy tavící teplota titanu se pohybuje okolo 1635 °C a teplota mědi je zhruba 1100 °C, je zřejmé, že bez chlazení kelímku dojde k problému. V takovém případě by tedy došlo k roztavení měděného kelímku. Následný kontakt vody s taveninou by vedl ke dvoustupňové reakci. Nejprve by proběhla exploze páry, kterou by následoval výbuch vodíku. Na základě výpočtů bylo zjištěno, že kombinace těchto výbuchů by byla ekvivalentní téměř 91 kg TNT. Na obrázku 21 je vidět stav pece po explozi.^[23]



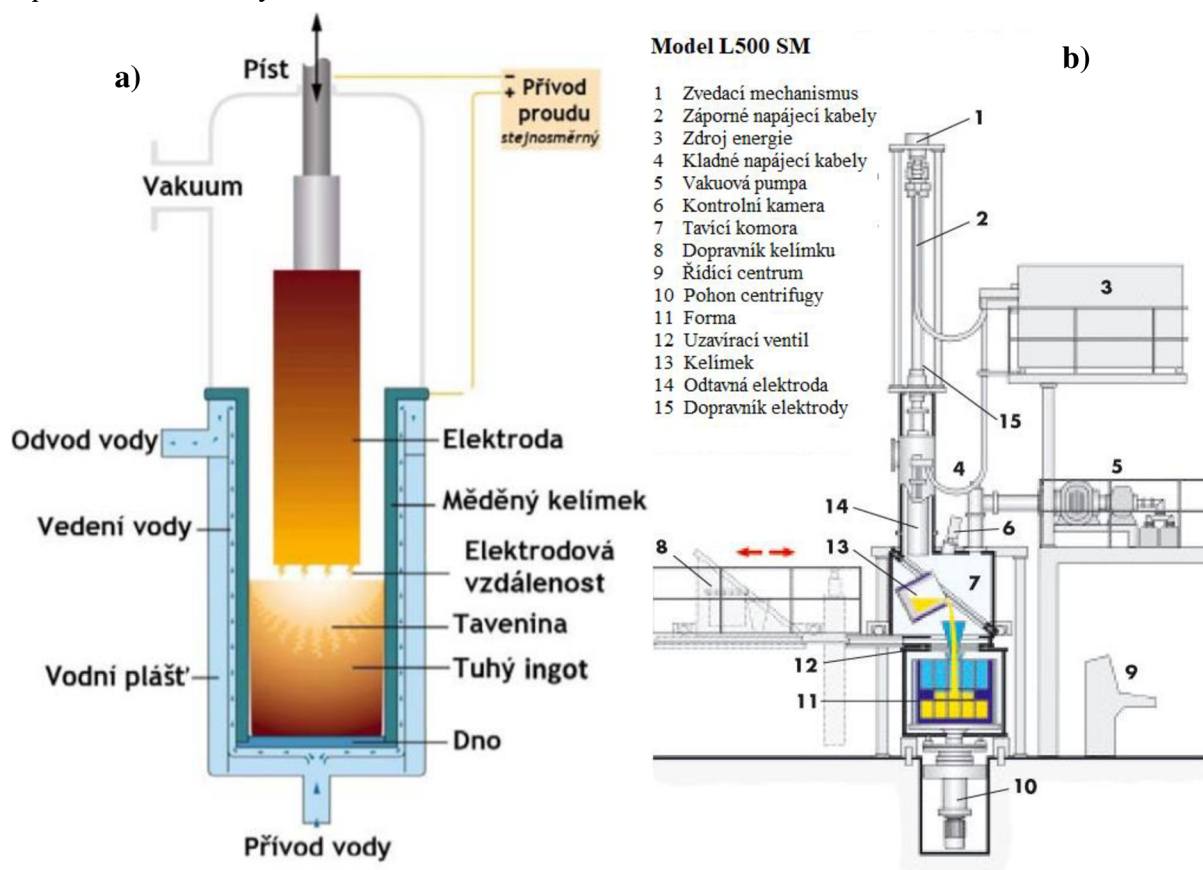
Obr. 21 Stav pece před a po explozi [23]

3.1.1 Obloukové tavení ve vakuu (VAR)

Vakuové obloukové přetavení (obr. 22a) je modifikací elektrické obloukové pece. Je založeno na principu kontinuálního přetavení odtavné elektrody ve vakuu pomocí elektrického oblouku. Působením stejnosměrného proudu vznikne elektrický oblouk mezi elektrodou a základovou deskou měděného kelímku, který je chlazený vodou. Vlivem elektrického oblouku začne vznikat teplo, které má za následek natavování špičky elektrody. Jelikož dno kelímku je chlazeno, odkapávající tavenina rovnou tuhne a vzniká nový ingot. Jak už název napovídá, celý proces probíhá za vysokého vakuu.^{[20],[24]}

Výsledná struktura ingotu po tavení technologií VAR je závislá na lokální rychlosti tuhnutí a teplotním gradientu na rozhraní taveniny/pevné fáze. Při udržování vysokého gradientu dochází k usměrněnému tuhnutí ode dna k vrcholu ingotu. Na základě zvyšující se rychlosti přetavení dochází ke zvětšení hloubky lázně, což má za následek větší úhel růstu zrn. To může vést až k přerušení usměrněného růstu. I při dodržení optimálních podmínek mohou vznikat v ingotu vady jako letokruhy, tmavé skvrny a bílé skvrny, které mohou vést k vyřazení ingotu.^{[20],[24]}

Zásadním problémem při této metodě je cena elektrod, kterou se nedaří snížit ani recyklací, neboť jejich zpracování je spojeno s přísnými podmínkami na chemické složení. Na druhou stranu výrazně snižuje množství nežádoucích plynů (vodík a dusík) a také dochází ke snížení množství oxidů. Díky směrovému tuhnutí se zabraňuje makro segregaci a snižuje se riziko mikro segregace. Z důvodu využití chlazeného kelímku je u této metody problém s přehřátím taveniny.^{[20],[24]}



Obr. 22 Metoda VAR a) Přetavování elektrody b) Pec na přetavení a lití [20],[25]

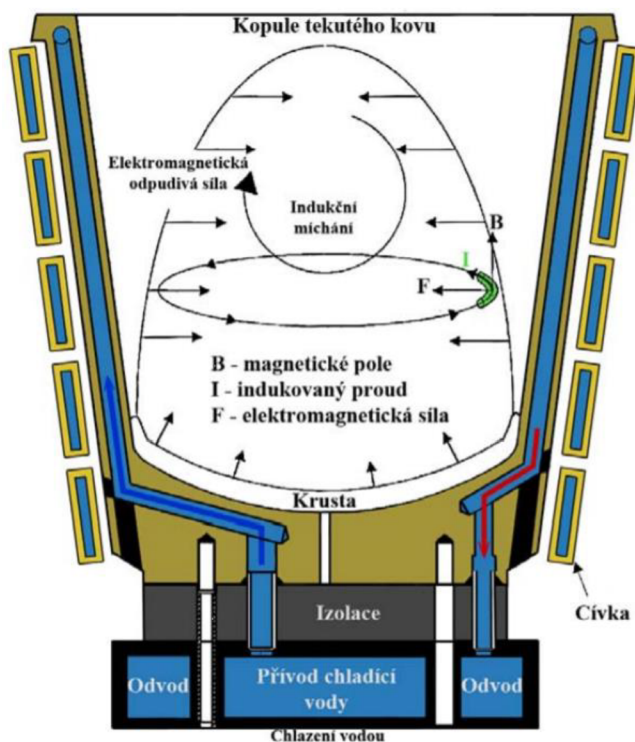
Mimo přípravu primárních ingotů se metoda obloukového přetavování s pecí vybavenou měděným, vodou chlazeným kelímek používá i při finálním přetavení (obr. 22b). Po natavení dostatečného množství taveniny, se vypne proud procházející elektrodou. Ta se následně zvedne, kelímek se nakloní a tím se nalije tavenina do formy. Jelikož je ale oblouk mezi elektrodou a kelímek jediným zdrojem tepla, a kelímek je neustále ochlazován, vznikne problém s okamžitým ochlazováním taveniny, protože měděný kelímek je stále ochlazován vodou. Proto je nutné, aby proces zvednutí elektrody proběhl v co nejkratším čase. Pro finální vytvarování taveniny ve formě se následně používá metoda odstředivého odlévání, která je popsána níže v textu. Jednou z firem, které dodává pece na obr. 22b, je společnost ALD. Jejich pece dokáží pojmout taveninu s hmotností od 5-500 kg.^{[24],[25]}

3.1.2 Indukční tavení ve vakuu (VIM)

Indukční tavení je založeno na střídavém proudu, který prochází přes dutou, vodou chlazenou měděnou cívku. Tímto je vyvolané magnetické pole, které vytváří vířivé proudy ve vsázce. Na základě těchto proudů následně dochází k ohřívání, resp. k natavování materiálu. Indukovaný proud ve vsázce generuje sekundární magnetické pole, které zapříčiňuje míchání taveniny. Toto promíchávání vede k chemické i tepelné homogenitě. Kvůli vysoké reaktivitě titanu je nutné, aby celý proces probíhal ve vakuu. Tím se zajistí menší ztrátovost legujících prvků, které by jinak měly snahu tvořit oxidy. Na základě použitého tavícího kelímku se rozlišuje: ^[20]

- Indukční tavení v chlazeném kelímku (ISM) se provádí v segmentované měděné, vodou chlazené nádobě umístěné v indukční cívce ve vakuu nebo v inertním plynu (obr. 23). Měděný kelímek tvořený jednotlivými segmenty, tzv. „prsty“, je chlazen vodou. Kelímkem prochází magnetické pole, které je tvořené cívkou a vytváří teplo, které taví vsázku. Magnetické pole mimo tavení má za úkol míchat roztavený kov, čímž zajišťuje lepší homogenitu a rychlejší tavbu. Na dně kelímku zůstává tenká vrstva neroztaveného kovu a tím vytváří ochrannou skořepinu pro roztavený kov. Rozhraní mezi skořepinou a kelímkem tvoří tepelný odpor omezující vedení tepla z horké taveniny do studeného kelímku. Dalším podstatným úkolem magnetického pole je zabraňování vzniku fyzického kontaktu mezi taveninou a stěnami kelímku, což snižuje tepelné ztráty kelímku. ^[20]

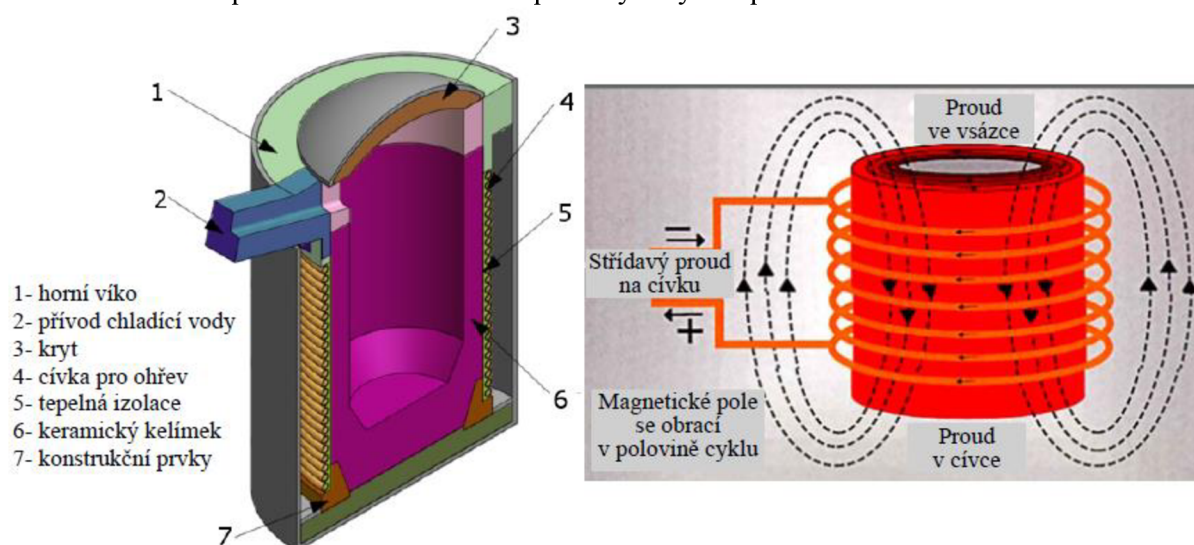
Zásadní výhodou pro ISM je fakt, že nepotřebuje tavnou elektrodu jako například technologie VAR a jako vsázku lze použít prakticky cokoliv. Z toho vyplývá podstatné snížení nákladů na vsázku. Tím že nedochází ke kontaktu mezi taveninou a kelímkem, je odstraněn problém se vznikem nečistot z kelímku a mohou tak vznikat vysoce kvalitní slitiny. Na druhou stranu celý proces tavby má nízkou energetickou účinnost. Dále může vznikat problém s nezaběhnutím odlitku spojený s nedostatečným přehřátím taveniny kvůli chlazení. Z tohoto důvodu vzniká problém s odléváním tenkostěnných odlitků. ^[20]



Obr. 23 Metoda ISM [20]

- Tavení v keramickém/grafitovém kelímku (obr. 24) je jednou z možností, jak překonat problémy spojené s nedostatečným přehřátím taveniny u ISM a tedy vytvořit možnost pro využití indukčního tavení i pro tenkostěnné odlitky. Další výhodou je pak možnost kontroly přehřátí taveniny. Pro tavení TiAl slitin se používají kelímky z materiálů jako ZrO_2 , Y_2O_3 , CaO a grafitu, avšak ani jeden z materiálů není dostatečně inertní vůči tavenině. Proto dochází ke kontaminaci taveniny oxidy. Z hlediska znečištění jsou vhodnější materiály ZrO_2 a Y_2O_3 , avšak mají vysokou pořizovací cenu, oproti tomu CaO není tak nákladný, ale je náchylný na vlhkost.^[20]

Na druhé straně grafit je levný materiál s dobrou zpracovatelností jak tavicích kelímků, tak forem. I když může dojít ke kontaminaci taveniny uhlíkem, tento jev nemusí mít negativní vliv na mechanické vlastnosti. Při legování uhlíkem totiž dochází ke zlepšení odolnosti proti tečení a odolnosti proti vysokým teplotám.^{[20],[26]}



Obr. 24 VIM v keramickém kelímku [20]

3.2 Odlévání slitiny

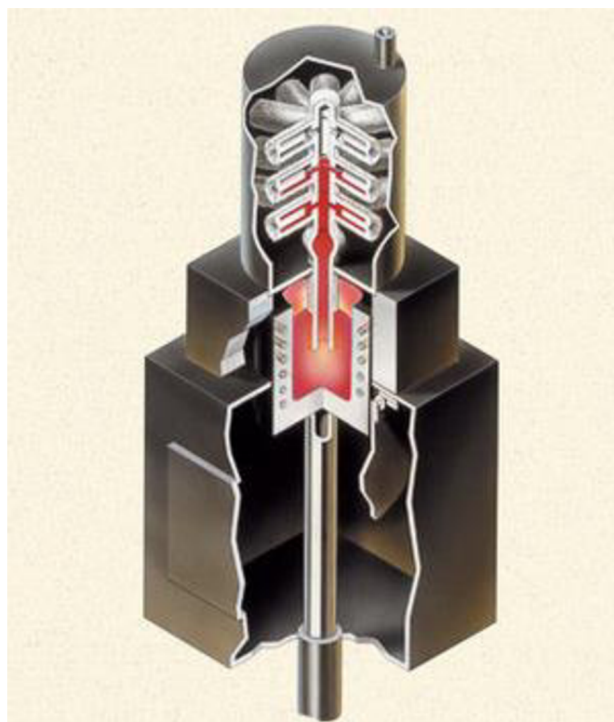
Pro samotné odlévání se využívá především metod, které zlepšují zabíhavost taveniny, neboť ta je u γ -TiAl slitin nízká. Proto se například základní technologie gravitačního odlévání v praxi příliš nevyužívá, protože ani dostatečné přehřátí, nemusí zajistit dostatečnou zabíhavost. Mezi ty nejvyužívanější metody patří antigravitační nízkotlaké lití, LEVICAST a odstředivé lití.

3.2.1 Antigravitační nízkotlaké lití ve vakuu

Proces antigravitačního nízkotlakového lití (obr. 25) byl vyvinut firmou Hitchiner v 70. letech dvacátého století. Hlavní výhodou této metody spočívá ve schopnosti kontrolovat rychlost plnění. Díky tomu je možné odlévat složitější tvary odlitků. Maximální rychlost je teoreticky omezena hodnotou 0,5 m/s. Při této rychlosti je zajištěno zaplnění formy bez vzniku defektů. Další výhody spočívají ve zmenšení eroze formy, nízkému obsahu oxidů a vysokému využití tekutého kovu.^{[27],[28]}

Nejběžnější způsob vedení taveniny proti gravitaci je založený na nízkotlakém lití. Při této metodě, když je kov dostatečně nataven, dojde ke vpuštění plynu (argonu). Ten následně tlačí taveninu směrem vzhůru do formy, ve které je vakuum.^[27]

Dalšími možnostmi vedení taveniny jsou například elektromagnetické pumpy, které se používají například na slitiny hliníku. Jejich problémem je, že trpí na určitou formu odplynění podobnou bublinkám u šampaňského. Tyto bublinky poté stoupají skrz kov vzhůru. Dále se používají odstředivé a pneumatické pumpy, jejich použití ale není příliš časté.^[27]

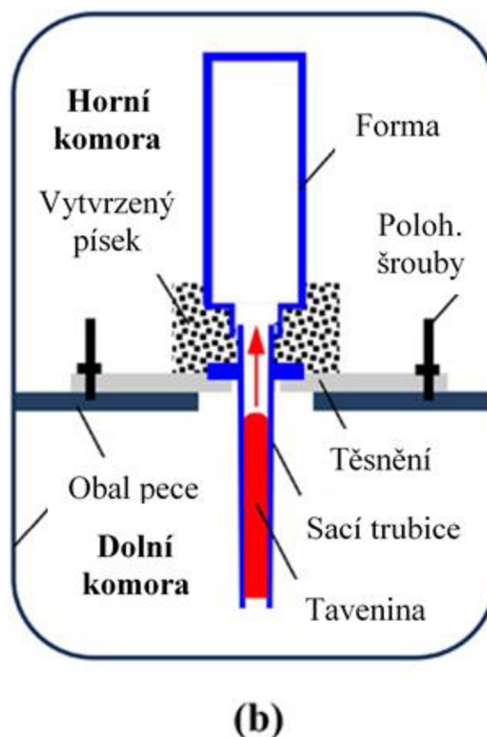
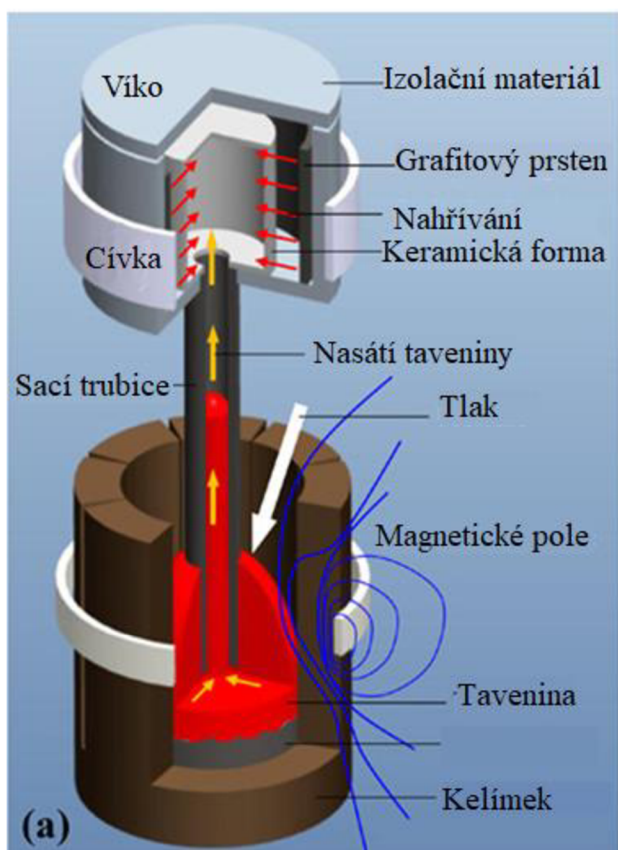


Obr. 25 Technologie CLV [28]

3.2.2 LEVICAST

Základní snahou u slitin TiAl je dosažení nízkých obsahů oxidů v tavenině, čímž selepší vlastnosti při pokojové teplotě (např. tažnosti). Tyto oxidy vznikají při tavení reakcí taveniny s tavicím kelímkem. K jejich snížení byla vyvinuta kombinace dvou technologií, tj. antigravitačního nízkotlakého lití a levitačního tavení ve studeném kelímku. Tato technologie se nazývá LEVICAST a byla vyvinuta a patentována firmou Daido Steel v Japonsku. Na základě obr. 26 lze vysvětlit základní princip této metody. Slitina je tavena ve speciálním, vodou chlazeném kelímku z mědi, v ochranné atmosféře vytvořené argonem. Podstatným faktorem je udržování taveniny mimo stěny kelímku, aby došlo ke snížení tepelných ztrát. Toho je dosaženo pomocí magnetického pole generovaného indukčními cívkami. Po tavení proces pokračuje nízkotlakým litím do keramických skořepin.^[2]

Výhodou této metody, jak už bylo zmíněno výše, je především nízký obsah oxidů. Jejich navýšení je po odlití takřka nulové. Další výraznou výhodou je krátká doba celého procesu (jak tavení, tak lití). Tato technologie je považována za budoucnost odlévání TiAl slitin.^[2]



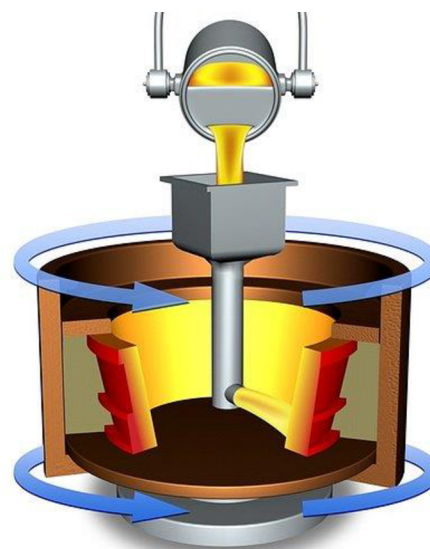
Obr. 26 LEVICAST a) Schéma metody b) Rozhraní horní a dolní komory [29]

3.2.3 Odstředivé odlévání

Tento proces je založený na rotaci přehřáté formy, do níž se lije roztavený kov. Její rotací vzniká odstředivá síla, která působí na taveninu a rovnoměrně ji rozděljuje po stranách formy. Působením této síly je pozitivně ovlivněn povrch odlitku, jeho struktura a pevnost. Mimo lepší homogenitu jsou další výhodou i relativně nízké náklady. Navíc není potřeba použití výfuků, protože plyny odchází volně do prostoru.^[30]

Jakmile se forma začne plnit, hustější tavenina je tlačena blíže ke stěně. Směrové tuhnutí následně postupuje od vnějšího průměru k vnitřnímu, méně hustý materiál se pak spolu s nečistotami pohybuje směrem k vnitřnímu průměru. Po ztuhnutí se tyto nečistoty opracují a vznikne výsledná struktura bez deformací a plynových bublin.^[30]

Forma může být orientována buď do vertikální nebo horizontální polohy v závislosti na konfiguraci požadované části. Horizontální je vhodná především pro odlévání válcových součástí s výrazně větší délkou nežli průměrem. Pro odlévání turbodmychadlových kol se používá forma s vertikální polohou (obr. 27). Mimo rozdělení na základě osy rotace je možné ještě tuto metodu rozdělit na základě shodnosti osy odlitku a rotace formy. Jestliže jsou tyto osy stejné, jedná se o odlévání pravé, pokud se liší je nazýváno nepravé.^[30]



Obr. 27 Vertikální odstředivé lití [30]

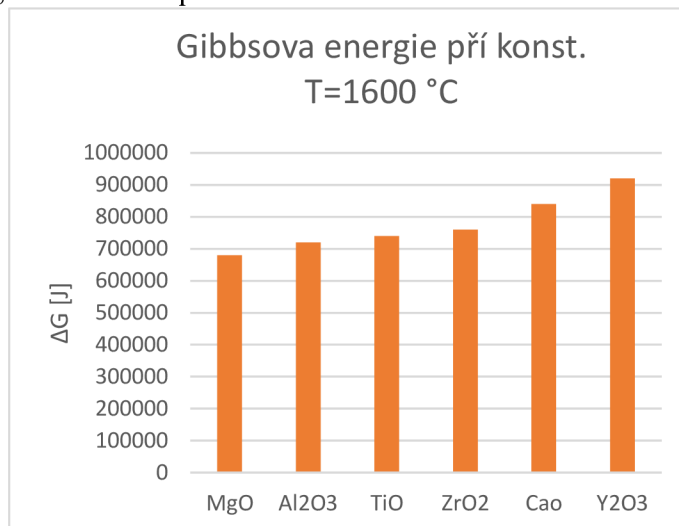
3.2.4 Formy

Podobně jako u tavení i problematika forem je spojená s vysokou afinitou titanu ke kyslíku. Z čehož vyplývá, že i u nich je snaha využívat materiály, které budou snižovat množství oxidů vzniklých jejich reakcí s roztaveným kovem. Mimo to je požadováno, aby byly formy dostatečně pevné, prodyšné a měly dobrou tepelnou stabilitu a rozpadavost. Využívají se především formy grafitové, keramické s povrchovou kovovou vrstvou a oxidové keramiky.^[31]

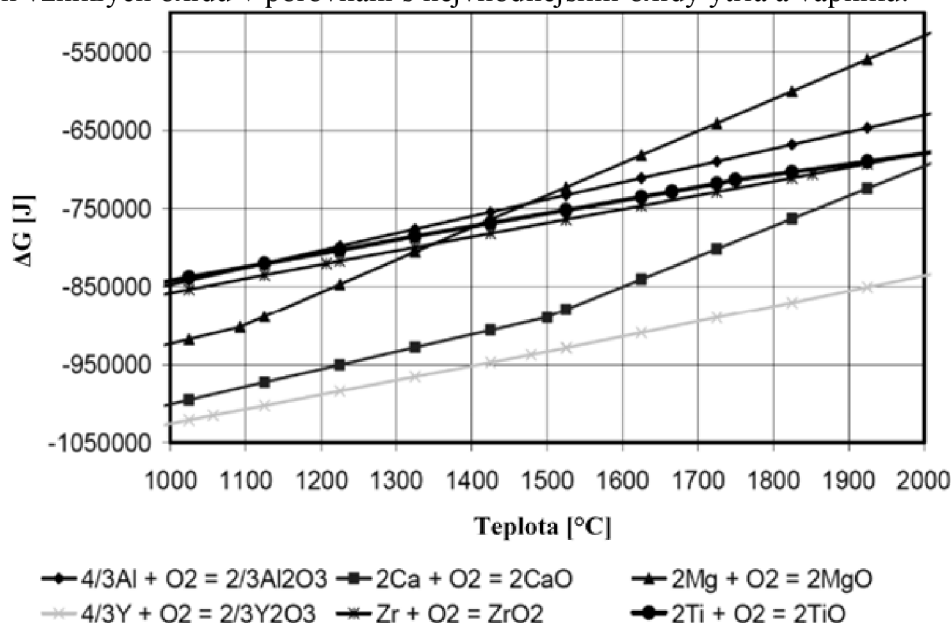
Dříve se využívaly spíše výše zmíněné formy grafitové a keramické s povrchovou kovovou vrstvou. Jejich problém spočíval v poměru kvalita/cena. Grafitové formy jsou levné ale na druhou stranu se u nich mohou vyskytovat trhliny a to v rozmezí až 0,1 - 0,15 mm. Oproti tomu keramické formy s kovovými nátěry výrazně snižují tyto trhliny, ale jsou velmi drahé. Navíc ani jejich chemická stabilita není dobrá.^[31]

V současné době se mnohem více aplikují formy z oxidových keramik jako jsou např. Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , CaO

a Y_2O_3 . Klíčovým faktorem pro jejich využití je změna Gibbsovy volné energie, která indikuje, jak jsou jednotlivé oxidy stabilní oproti oxidům titanu. Graf na obrázku 28 demonstruje hodnoty změny Gibbsovy volné energie jednotlivých materiálů při konstantní teplotě 1600 °C. Jeho hodnoty jsou založené na obr. 29, který zobrazuje průběh změny Gibbsovy volné energie v závislosti na teplotě. Dle těchto grafů lze konstatovat, že materiály, které mají podobnou změnu Gibbsovy volné energie jako TiO , nejsou příliš vhodné a lze u nich předpokládat intenzivnější reakce. Avšak vzhledem k vyššímu podílu hliníku ve slitinách $\gamma\text{-TiAl}$, který snižuje aktivitu titanu, je možné použít i tyto materiály. I tak je ovšem nutné počítat s větším množstvím vzniklých oxidů v porovnání s nejhodnějšími oxidy yttria a vápníku.^{[31],[32],[33]}



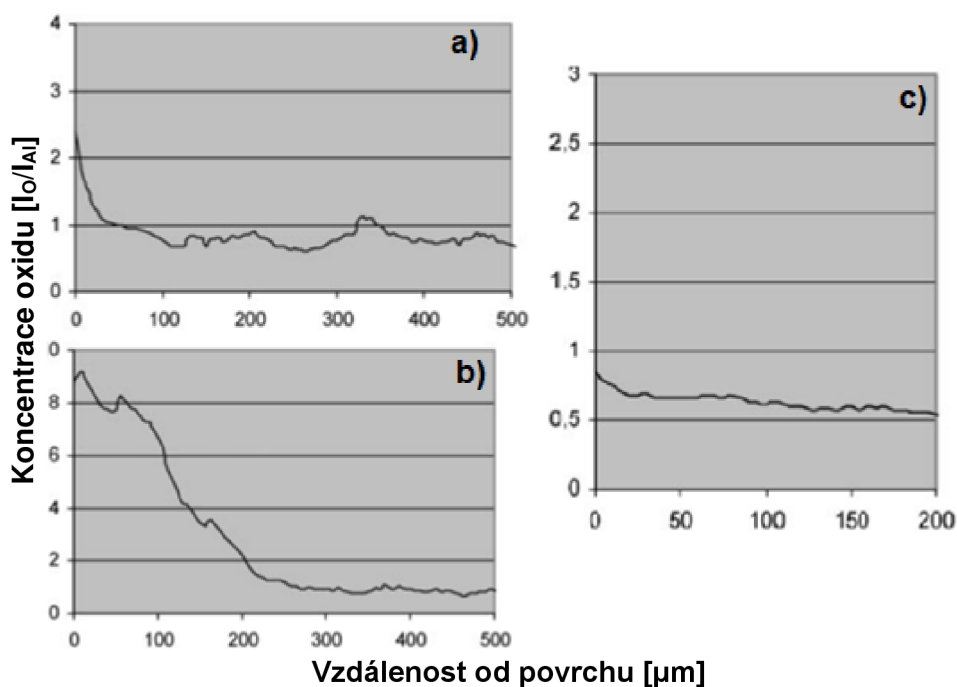
Obr. 28 Porovnání stability materiálu [32]



Obr. 29 Průběh změny Gibbsovy volné energie v závislosti na teplotě [32]

Experiment z [33] měl za úkol porovnat výsledky Y_2O_3 , ZrO_2 a SiO_2 . Nejprve byly vytvořeny vzorky z γ -TiAl slitiny, které měly tvar válce s průměrem 20 mm a výškou 85 mm. Tavení bylo provedeno pomocí metody VIM v keramickém kelímku ze ZrO_2 s vrstvou Y_2O_3 . Každá forma byla následně naplněna metodou odstředivého lití za teploty 1600 °C. Jednotlivé válce byly poté rozřezány v polovině, z nichž se vytvořily vzorky. Výsledky byly poté vyhodnoceny pomocí grafů, přičemž hlavním měřítkem bylo množství oxidů v závislosti na vzdálenosti od povrchu (obr. 30).

Z grafů je patrné, že největší množství oxidů se vytvoří v odlitku odlévaném v SiO_2 (obr. 30b), které tedy lze vyhodnotit jako zcela nevhodné. U odlitků odlévaných v Y_2O_3 (obr. 30c) a ZrO_2 (obr. 30a) byl potvrzený předpoklad, že čím větší je rozdíl mezi změnou Gibbsovy energie dané keramiky vůči změně Gibbsovy energie oxidu titanu, tím dojde k menšímu ovlivnění materiálu oxidy.^[33]

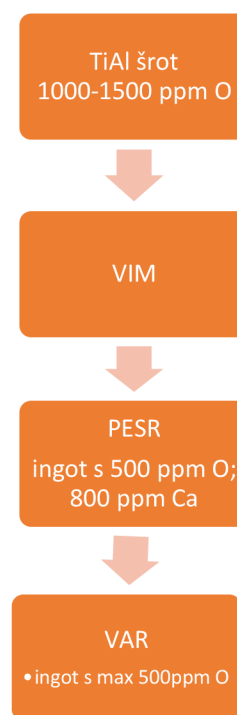


Obr. 30 Koncentrace oxidu v odlitku [33]

3.3 Recyklace

Jak už bylo zmíněno zásadními problémy pro širší využití titan aluminiových slitin jsou vysoké náklady jak z hlediska pořizovací ceny materiálu, tak z hlediska výrobních nákladů. Výtěžnost slitiny γ -TiAl při odlévání je srovnatelná s klasickými titanovými slitinami, tedy se ztrátami v rozsahu 40-60 %. Na druhou stranu jsou slitiny γ -TiAl produkovány s výrazně vyšší cenou v porovnání s klasickými slitinami z důvodu striktnějších požadavků na homogenitu. Z toho důvodu ztráty během odlévání γ -TiAl mají větší dopad na výslednou cenu produktu nežli u klasických titanových slitin. Od roku 2000 se tedy začala společnost IME zaměřovat na možnosti recyklace a tím se pokusit snížit cenu materiálu bez zhoršení jeho vlastností. Zásadním problémem při použití recyklovaného šrotu je vysoký obsah kyslíku ve slitině. Úkolem kroků spojených s recyklací je tedy snížení jeho obsahu. Překážkou pro jeho odstranění je jeho vysoká afinita k titanu, avšak tento problém lze vyřešit při použití vápníku jakožto redukčního činidla, který má daleko vyšší afinitu ke kyslíku než titan a hliník.^[34]

Celý proces je přehledně zobrazen na obrázku 31. V prvním kroku se provádí tavení ve vakuové indukční peci v inertní atmosféře argonu, přičemž podobně jako u klasického tavení byly použity keramické kelímky, přesněji řečeno kelímky z CaO. Teplota odlévání byla určena na 1600-1700 °C. Aby se předešlo tepelným rázům v kelímku, teplota byla zvyšována postupně každou půlhodinu. Jakožto redukční činidlo se používá vápník, především kvůli své vysoké afinitě k oxidu. Dalším důvodem je, že redukcí vzniklý CaO plave na hladině taveniny. Avšak při takto vysoké procesní teplotě nelze jako redukční činidlo použít čistý vápník, neboť se začíná vypařovat při teplotě 1494°C. Proto se používají CaAl slitiny anebo by další možností mohly být hliníkové dráty s vápníkovým jádrem. Redukce pomocí drátů ale není dostatečná, neboť jádro je pořád kovové a vápník se v tomto případě začíná vypařovat okamžitě při kontaktu s taveninou. Oproti tomu při využití CaAl slitin, konkrétně CaAl₂, dochází ke snížení kyslíku na zhruba 700 ppm. Finálním krokem tohoto procesu je odlití tekutého kovu do válcovité, vodou chlazené měděné formy.^{[34],[35]}



Obr. 31 Proces recyklace [35]

V dalším kroku se realizuje elektrostruskové přetavování (PESR), které funguje na principu malé kapičky kovu propadávající reaktivní struskou. Díky tomu se velká část povrchu taveniny dostane do styku se struskou. Kromě velkého reakčního povrchu pro recyklaci TiAl je další výhodou přetavování PESR vysoký procesní tlak 20 bar. Použitím tlaku 20 barů argonu nad kapalnou struskou může být odpařování Ca kineticky potlačeno, a proto může být jako redukční činidlo použit čistý kovový Ca. Přesto nedojde k ovlivnění vypařovacího tlaku Ca a tak lze zaznamenat malé množství Ca na stěnách pece po dokončení operace a tedy může dojít i ke zvýšení obsahu Ca v tavenině. Pro nejlepší výsledky dezoxidace se tedy využívá struska složená z CaF₂ s příměsí čistého Ca. Po přetavení se odstraní struska a vzniklý ingot (obr. 32) se použije jako elektroda pro poslední proces.^[35]



Obr. 32 Vzhled ingotu po PESR [35]

Pro odstranění přebytečného rozpuštěného Ca a H nebo nekovových inkluzí (NMI) se následně používá vakuové obloukové přetavování (VAR), které už bylo popsáno v textu výše. Tato technologie kombinuje nízký procesní tlak mezi 4-10 mbar s dobrou separací NMI díky nízkým vrstevným natavením elektrody. Výsledné množství Ca v tavenině může dosáhnout pouze 40 ppm a obsah kyslíku kolem 500 ppm, což lze považovat za velmi dobrou čistotu slitiny.^[35]

4 ZÁVĚR

Na základě této práce lze potvrdit, že titan aluminidy mají perspektivní vlastnosti spojené především s nízkou hustotou a dobrou odolností proti oxidaci a tečení. Na druhou stranu jsou výrazně limitované svou nízkou tažností a špatnou obrobitelností. Z toho důvodu je zpracování založeno především na odlévání, které ale čelí problému s vysokou afinitou ke kyslíku a špatnou zabíhavostí. Proto je nutné jakékoliv technologické postupy provádět ve vakuu nebo v inertním prostředí argonu. Zabíhavost lze vylepšit přehřátím taveniny, které ale nelze plně zajistit u některých metod tavení kvůli použití chlazeného kelímku. Na druhou stranu jsou tyto metody nejlepší z hlediska nízkého ovlivnění chemické struktury taveniny. Více se pro finální tavení a následné odlévání používají metody spojené s keramickými kelímkami, resp. formami u kterých lze dosáhnout dostatečného přehřátí taveniny, ale za cenu mírného ovlivnění oxidy. Problémem všech metod je velké množství kroků potřebných k dosažení dostatečné čistoty, čímž se zvyšuje již tak vysoká cena vstupního materiálu. K jejímu snížení může vést systém recyklace, jehož postup je v práci uveden.

Výzkum v oblasti titan aluminidů udělal v posledních letech výrazný pokrok v oblasti technologického zpracování. I přes tento fakt je stále jeho širší využití limitováno, jak už bylo zmíněno výše, vysokou cenou, která je příliš vysoká i navzdory lepším vlastnostem například oproti niklovým superslitinám. Přestože na základě testů, které byly zmíněny v této práci a potvrdily lepší vlastnosti, je jejich využití v oblasti turbodmychadel i nadále vázáno především na závodní odvětví, kde vysoká cena nepředstavuje překážku. Je ovšem možné, že při neustálém zpřísnování ekologických limitů spojených s emisemi CO₂ u dieselových motorů budou firmy nuceny, pozitivní vlastnosti tohoto materiálu využít. Posun v aplikaci je vidět především v leteckém průmyslu, kdy v roce 2011 došlo k uvedení Boeingu 737 Dreamliner spolu s motorem GENX-1B, který obsahuje nízkotlaké lopatky právě ze slitin TiAl. Pro stejnou aplikaci se rozhodla i konkurence Boeingu, tj. firma Airbus u svého modelu A320neo.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [36]

- [1] KOTHARI, Kunal, Ramachandran RADHAKRISHNAN a Norman M. WERELEY. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2012, **55**, 1–16. [cit. 2019-05-16]. ISSN 03760421. Dostupné z: doi:10.1016/j.paerosci.2012.04.001
- [2] NODA, T. Application of cast gamma TiAl for automobiles. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 1998, **6**(7–8), 709–713. [cit. 2019-05-16]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/s0966-9795(98)00060-0
- [3] TETSUI, Toshimitsu. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering: A* [online]. Elsevier B.V, 2002, **329–331**, 582–588. [cit. 2019-05-16]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01584-2
- [4] Borg Warner EFR –The Worlds Most Advanced Aftermarket Turbocharger. In: *Pure tuning* [online]. 2008, 7. ledna 2011 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://pure-tuning.com/blog/?p=257
- [5] F.C, Campbell. Titanium Aluminide Intermetallics. *Lightweight Materials - Understanding the Basics*. ASM International, 2012, s. 299-324. ISBN 9781615038497. Dostupné také z: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpLMUB000B/id:kt00AW5884/lightweight-materials/lightweigh-titanium-aluminide?kpromoter=Summon
- [6] LIU, J. Phase transformations and stress evolution during laser beam welding and post heat treatment of TiAl-alloys [online]. 2015, s.1-8. [cit. 2019-05-16]. ISSN 2191-7833. Dostupné z: https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/hzg_reports_2015/hzg_report_2015_3.pdf
- [7] WERWER, M, R KABIR, A CORNEC a K.-H SCHWALBE. Fracture in lamellar TiAl simulated with the cohesive model. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. Elsevier, 2007, **74**(16), 2615-2638 [cit.2019-05-16]. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2006.09.022
- [8] JOVANOVIĆ, M. T., B. DIMČIĆ, I. BOBIĆ, S. ZEC a V. MAKSIMOVIĆ. Microstructure and mechanical properties of precision cast TiAl turbocharger wheel. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier B.V, 2005, **167**(1), 14–21.[cit. 2019-05-16]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.03.019
- [9] KONG, Fantao, Yuyong CHEN a Fei YANG. Effect of heat treatment on microstructures and tensile properties of as-forged Ti-45Al-5Nb-0.3Y alloy. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2011, **19**(2), 212–216. [cit. 2019-05-16]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/j.intermet.2010.08.012
- [10] WU, Xinhua. Review of alloy and process development of TiAl alloys. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2006, **14**(10), 1114–1122. [cit. 2019-15-17]. ISSN 0966-9795. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.10.019
- [11] SRUTI NEELAM, Naga, Amit BHATTACHARJEE, K.R. RAVI, Vivek CHANDRAVANSHI a S. BANUMATHY. The Effect of Nb addition on microstructure, oxidation behavior and strength of some γ -TiAl alloys. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2018, **5**(2), 5514–5520. [cit. 2019-15-17]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2017.12.141

- [12] LIN, J. P., L. L. ZHAO, G. Y. LI, L. Q. ZHANG, X. P. SONG, F. YE a G. L. CHEN. Effect of Nb on oxidation behavior of high Nb containing TiAl alloys. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2011, **19**(2), 131–136. [cit. 2019-05-17]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/j.intermet.2010.08.029
- [13] GENX-1B. In: *Engine Lease Finance* [online]. Shannon [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://elfc.com/engines/genx-1b/>
- [14] Titanium Aluminide Machining. In: *Moeller aircraft* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.moelleraircraft.com/ti-al1.htm>
- [15] SCHANK, CRAIG. Titanium: Titanium Medical Metal of Choice. In: *Supra Alloys* [online]. 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.supraalloys.com/medical-titanium.php>
- [16] ZAKARIA, Mohd Yusuf, Abu Bakar SULONG, Norhamidi MUHAMAD, Muhammad Rafi RAZA a Mohd Ikram RAMLI. Incorporation of wollastonite bioactive ceramic with titanium for medical applications: An overview. *Materials Science and Engineering C* [online]. Elsevier B.V, 2019, **97**(December 2017), 884–895. [cit. 2019-05-17]. ISSN 18730191. Dostupné z: doi:10.1016/j.msec.2018.12.056
- [17] PROBLEMATICKÝ KYČELNÍ KLOUB. In: *Mluvme o kloubech* [online]. 2019, 17. listopadu 2017 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://mluvmeokloubech.cz/2017/11/problematicky-kycelni-kloub/>
- [18] LORIA, Edward A. Quo vadis gamma titanium aluminide. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2001, **9**(12), 997–1001. [cit. 2019-05-21]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/S0966-9795(01)00064-4
- [19] Princip turbodmychadla. In: *FlexaMi Auto* [online]. 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.flexamiauto.cz/teorie/>
- [20] LOSERTO VÁ, Monika. *Technologie speciálních slitin* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013 [cit. 2019-05-21]. ISBN 9788024833798. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/07_Technologie_speciálních_slitin/Losertova_Technologie_speciálních_slitin.pdf
- [21] Titanium Metals - Titanium Sponge. In: *TOHO TITANIUM CO., LTD.* [online]. 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge.html>
- [22] ŠUPÁLEK, Milan, 2009 *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [23] POULSEN, E. Safety-related problems in the titanium industry in the last 50 years. *JOM* [online]. New York: Springer-Verlag, 2000, **52**(5), 13-17 [cit. 2019-05-21]. ISSN 1047-4838. DOI: 10.1007/s11837-000-0024-1.
- [24] GÜTHER, Volker, Melissa ALLEN, Joachim KLOSE a Helmut CLEMENS. Metallurgical processing of titanium aluminides on industrial scale. *Intermetallics* [online]. Barking: Elsevier BV, 2018, **103**(June), 12–22. [cit. 2019-05-21]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/j.intermet.2018.09.006
- [25] MELTING FURNACE / BELL / INDUCTION / VACUUM. In: *Direct Industry* [online]. 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ald/product-21806-1463099.html>
- [26] GOMES, F, Joaquim BARBOSA a C Silva RIBEIRO. Induction melting of γ -TiAl in CaO crucibles. [online]. *Intermetallics* 2008, **16**(11), 1292–1297. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: doi:10.1016/j.intermet.2008.08.008

- [27] CAMPBELL, John. Counter Gravity Casting. *Advances in the Science and Engineering of Casting Solidification* [online]. 2016, (October), 357–362. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-48117-3_42
- [28] Countergravity Casting Services. In: *HITCHINER Manufacturing Co., Inc.* [online]. Milford, 2018 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.hitchiner.com/countergravity-casting-services>
- [29] YANG, Jieren, Hu WANG, Yulun WU, Xuyang WANG a Rui HU. A Combined Electromagnetic Levitation Melting, Counter-Gravity Casting, and Mold Preheating Furnace for Producing TiAl Alloy. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2018, **20**(2), 1–7. [cit. 2019-05-21]. ISSN 15272648. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201700526
- [30] DAVE OLSEN. *What is Centrifugal Casting and How Does It Work?* [online]. 2018 [vid. 2019-05-16]. Dostupné z: https://marketing.metaltex.com/smart-blog/what_is_centrifugal_casting_and_how_does_it_work
- [31] HAI, Han, Xie CHENG-MU a Zhao JIA-QI. Development and application of titanium alloy casting technology in China. *China Foundry* [online]. Foundry Journal Agency, 2005, **2**(4), 239–245. [cit. 2019-05-21]. ISSN 1672-6421. Dostupné z: <https://doaj.org/article/56806e963c7042d5a35f1ba75254063e>
- [32] FRIEDRICH, Bernd, Johannes MORSCHEISER a C LOCHBICHLER. Potential of ceramic crucibles for melting of titanium-alloys and gamma-titaniumaluminide. In: *51st international colloquium on refractories* [online]. 2008, s. 229–232. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.2084.0562
- [33] BARBOSA, J, H PUGA, C. S. RIBEIRO, O. M. N. D. TEODORO a A. C. MONTEIRO. Characterisation of metal/mould interface on investment casting of γ - TiAl. *International Journal of Cast Metals Research* [online]. Taylor & Francis, 2006, **19**(6), 331–338. [cit. 2019-05-21]. ISSN 1364-0461. Dostupné z: 10.1179/136404606X163497.
- [34] REITZ, J., C. LOCHBICHLER a B. FRIEDRICH. Recycling of gamma titanium aluminide scrap from investment casting operations. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2011, **19**(6), 762–768. [cit. 2019-05-21]. ISSN 09669795. Dostupné z: doi:10.1016/j.intermet.2010.11.015
- [35] SPIESS, Peter, Marek BARTOSINSKI, Todor STOYANOV, Julio AGUILAR a Bernd FRIEDRICH. A Closed-Loop Recycling Technology for γ -TiAl from Precision Cast Low Pressure Turbine Blades. *Chemie-Ingenieur-Technik: Verfahrenstechnik, Technische Chemie, Apparatewaren, Biotechnologie* [online]. 2015, **87**(11), 1580–1588. [cit. 2019-05-21]. ISSN 15222640. Dostupné z: doi:10.1002/cite.201500063
- [36] *Mendeley* [online]. Elsevier, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.mendeley.com/?interaction_required=true

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Řez turbodmychadlem a TiAl turbodmychadlové kolo [4]	8
Obr. 2 Ti-Al fázový diagram [6]	9
Obr. 3 Krystal. struk. a) Ti ₃ Al (α_2) b) TiAl (γ) [7].....	10
Obr. 4 Část Ti-Al fázového diagramu [1].....	11
Obr. 5 Mikrostruktura duální fáze [1]	11
Obr. 6 Částečný Ti-Al diagram [10].....	13
Obr. 7 Výsledky oxidačního testu [11].....	14
Obr. 8 Turbína Genx-1B a TiAl lopatka [13],[14]	15
Obr. 9 Náhrada kyčelního kloubu [17].....	16
Obr. 10 Odlité ventily z γ -TiAl [18].....	16
Obr. 11 Schéma turbodmychadla [19].....	17
Obr. 12 Lancer Evolution VI a turbodmychadlo TD05 [3].....	17
Obr. 13 Test otáček při vysokých teplotách [3].....	18
Obr. 14 Test rychlosti odezvy [3].....	18
Obr. 15 Vzhled turbíny po testu v motoru [3]	19
Obr. 16 Detail povrchu po testu [3].....	19
Obr. 17 Ukázka spoje TiAl s ocelovou hřídelí [3]	20
Obr. 18 Připojení kola k hřídeli [3]	20
Obr. 19 Výroba primárního ingotu [22]	21
Obr. 20 Krollův proces [21]	21
Obr. 21 Stav pece před a po explozi [23]	22
Obr. 22 Metoda VAR a) Přetavování elektrody b) Pec na přetavení a lití [20],[25].....	23
Obr. 23 Metoda ISM [20]	24
Obr. 24 VIM v keramickém kelímku [20].....	25
Obr. 25 Technologie CLV [28]	26
Obr. 26 LEVICAST a) Schéma metody b) Rozhraní horní a dolní komory[29]	27
Obr. 27 Vertikální odstředivé lití [30].....	27
Obr. 28 Porovnání stability materiálu [32].....	28
Obr. 29 Průběh změny Gibbsovy volné energie v závislosti na teplotě [32]	28
Obr. 30 Koncentrace oxidu v odlitku [33].....	29
Obr. 31 Proces recyklace [35]	30
Obr. 32 Vzhled ingotu po PESR [35].....	30

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání Ti-Al slitin se slitinami na intermetalické bázi za pokoj. teploty. [1],[5]..	10
Tab. 2 Vliv jednotlivých legujících prvků. [1].....	13