



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 SPALOVACÍ MOTORY

CASTINGS FROM TiAl ALLOYS FOR THE IC ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kašpar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Kašpar**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

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 spalovací motory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Slitiny TiAl jsou pro svou nízkou hustotu a zajímavé vysokoteplotní vlastnosti perspektivním konstrukčním materiálem pro ventily spalovacích motorů.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je odborná rešerše shrnující zkušenosti s výrobou a aplikací ventilů spalovacích motorů 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.

BLUM, M., G. JARCZYK, H. SCHOLZ, S. PLEIER, P. BUSSE a H. J. LAUDENBERG. Prototype plant for the economical mass production of TiAl-valves. Materials Science and Engineering: A. 2002, Volumes 329–331, 616-620. ISSN 0921-5093.

FU, P.X., et al. Centrifugal casting of TiAl exhaust valves. Intermetallics. 2008, 16(2), 130-138. ISSN 0966-9795.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

KAŠPAR Jan: Odlitky ze slitin TiAl pro spalovací motory

Práce je zaměřena na intermetalické slitiny TiAl. Rozbor jejich mikrostruktury včetně vlivu tepelného zpracování a legujících prvků. Dále se zabývá tavením a odléváním TiAl včetně bezpečnosti a procesu recyklace. V poslední části se věnuje využití slitiny v praxi se zacílením především na ventily spalovacích motorů.

Klíčová slova: TiAl, ventily spalovacích motorů, odlévání, tavení

ABSTRACT

KAŠPAR Jan: Casting form TiAl alloys for the IC engines

The bachelor thesis is focused on intermetallic alloys of TiAl. Analysis of microstructure including heat treatment and alloying. Next part is focused on melting and casting TiAl including safety of work and recyklation. Last chapter is developed to application mainly engine valves.

Keywords: TiAl, Engine valves, Casting, Melting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAŠPAR, Jan. *Odlitky ze slitin TiAl pro spalovací motory* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. 34s, Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121548>. 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 21.6.2020

.....

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji prof. Ing. Ladislavu Zemčikovi, CSc. za konzultace a cenné rady při vypracování této práce.

Obsah

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
ÚVOD	9
1 ROZBOR MATERIÁLU	10
1.1 Intermetalické slitiny	11
1.2 Mikrostruktura	12
1.3.1 Vliv mikrostruktury na tažnost	13
1.3.2 Vliv mikrostruktury na odolnost proti tečení a únavovou životnost	14
1.3.3. Vliv mikrostruktur na pevnost	14
1.4 Vliv příměsí	15
1.4.1. Legování niobem	15
1.5 Porovnání slitin titanu a superslitin Ni	16
2 ODLÉVÁNÍ SLITIN TiAl	17
2.1 Krollův proces a výroba ingotu	17
2.2 Metoda VAR	18
2.3 Metoda VIM	19
2.3.1. Metoda ISM	20
2.4 Bezpečnostní problémy	20
2.5 Recyklace titanu	22
2.6 Metody lití	22
2.6.1 Odstředivé lití	23
2.6.2 LEVICAST	24
3 APLIKACE SOUČASNÉ TECHNICKÉ PRAXI	25
3.1 Ventily spalovacích motorů	25
3.1.1. Proces sériové výroby ventilů	26
3.2 Turbíny leteckých motorů	27
3.3 Turbínová kola turbodmychadel	28
Závěr	29
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých obrázků	
Seznam použitých tabulek	

ÚVOD

Snížení hmotností rotačních a vratných částí motoru je klíčové pro zvyšování efektivity a výkonnosti motorů. Historie výzkumu γ -slitin TiAl je zatím relativně krátká, v hledáčku výzkumníků je teprve necelé čtvrt století. Do budoucna je s tímto materiálem možné počítat v nahrazení superslitin na bázi niklu v plynových turbínách a turbodmychadlech motorů s vysokou frekvencí otáček, oproti kterým nabízí při nižší hustotě dobré mechanické vlastnosti a jejich aplikací by bylo možné dosáhnout značné váhové úspory. Titanium alumidy lákají také řadou dalších vlastností, mezi které patří dobrá tuhost, korozní a creepová odolnost. V minulosti byly tyto vlastnosti převáženy obtížným obráběním při pokojové teplotě, avšak díky pokroku ve výrobě a lepšímu porozumění mikrostrukturám a deformačním mechanismům se prosadily na poli Formule jedna a jako materiály turbodmychadel sportovních vozů a motocyklů. Další využití nalézá TiAl v aviatice, kde byl aplikován v motorech Boeingu 787 Dreamliner. V oblasti letecké dopravy má tato slitina velice slibnou budoucnost, v turbínách proudových motorů nadzvukových civilních letadel, kde se s jeho využitím počítá, jako s materiálem na výrobu lopatek, jejichž pomocí dojde ke snížení hluku při startech a přistáních, a také úspore paliva. Snížení spotřeby paliva bylo hlavním podmětem i pro výzkum v Německu, kde probíhá společný vývoj automobilek, zaměřených na sériovou výrobu ventilů motorů.^{[1],[2],[3],[4],[5]}



Obr.1 Model ventilů ve čtyřválcovém spalovacím motoru [39]

1 ROZBOR MATERIÁLU

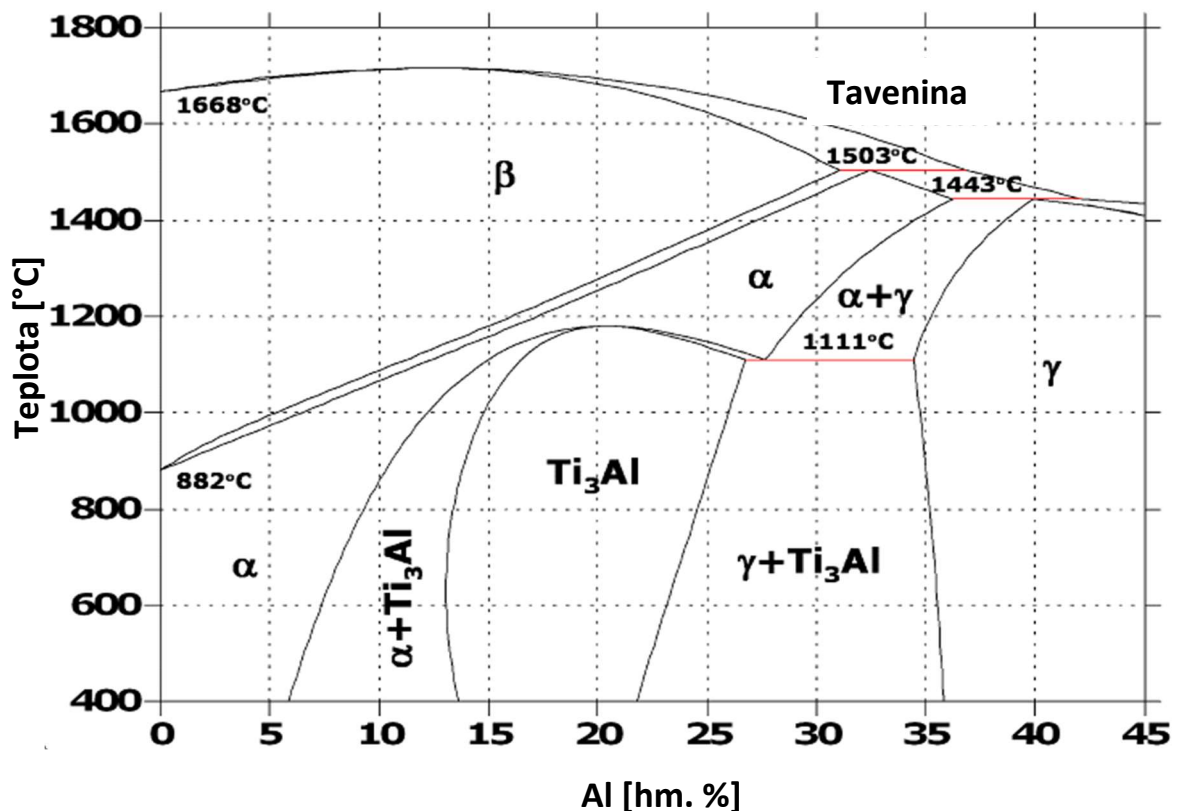
Existují dvě alotropické modifikace titanu. Za pokojové teploty má čistý titan hexagonální (hcp) krystalickou mřížku, která je brána jako fáze α . Za teploty 883 °C mřížka přechází na kubickou středově středěnou mřížku označovanou jako β fáze. Titan tvoří slitiny s mnoha prvky. Pro tvorbu substitučních tuhých roztoků jsou vhodné zejména kovy V. a VI.

Prvek	Hm. procenta	Efekt na strukturu
Al	2-7	α -stabilizátor
Sn	2-6	α -stabilizátor
V	2-20	β -stabilizátor
Mb	2-20	β -stabilizátor
Cr	2-12	β -stabilizátor
C	2-6	β -stabilizátor

Tab. 1 nejběžnější stabilizátory [6]

B skupiny, kde je nejmenší procentuální úchylka atomových poloměrů. Intersticiální tuhé roztoky titan tvoří pouze s prvky, které vnímáme jako nečistoty (C, N, O, H). Legováním titanu je možné dosáhnout změny teploty alotropické přeměny, legury tedy můžeme dělit na α stabilizátory, β stabilizátory a neutrální prvky.^{[6],[7]}

- Slitiny α : Praktický význam jako α stabilizátor má pouze hliník, který zvyšuje teplotu transformace na β -fázi. Tuhý roztok s titanem tvoří až do 26 hmotnostních procent, přičemž praktický strop je 7 %, kdy se slitiny stávají křehkými a obtížně tvářitelnými za tepla i za studena. Obecně se jedná o slitiny s velmi dobrou tepelnou stabilitou, tuhostí, žárupevností (do 300 °C) a dobrou svařitelností. Jsou odolné proti křehkému porušení i za nízkých teplot.^{[6],[7],[8],[9]}
- Slitiny pseudo α : Do základní báze Ti-Al, jsou přidány β -stabilizátory, popřípadě i neutrálně působící Sn a Zr. Obsah β fáze se poté pohybuje mezi 2 až 6 hm. %, efektem je zlepšení tvářitelnosti a zvýšení pevnosti až o pětinu.^{[6],[7],[8],[9]}



Obr. 2 Ti-Al fázový diagram [12]

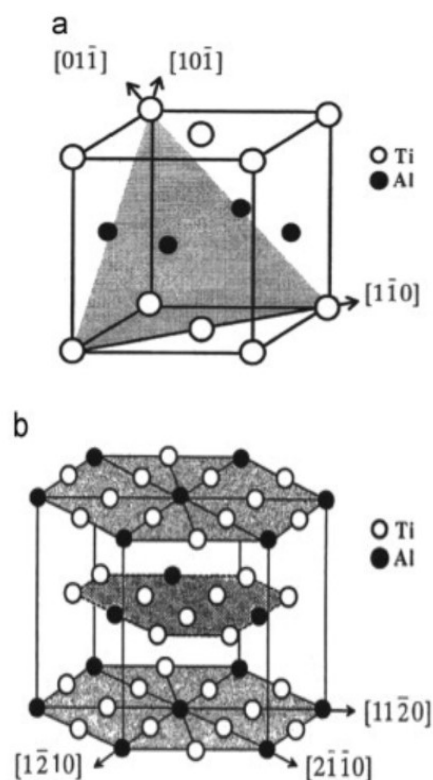
- Slitiny β : Jsou to slitiny, které stále ještě prochází vývojem. Hlavními přednostmi této skupiny je velmi dobrá tvářitelnost a vysoká pevnost do teplot 500 °C. Po vytvrzení je možné dosáhnout pevnosti v tahu až 1400 MPa. Nevýhodou těchto slitin je vyšší hmotnost a cena. [6],[7],[8],[9]
- Slitiny $\alpha+\beta$: U titanových slitin je dvoufázová struktura snadno dosažitelná a velmi variabilní, určujícími faktory poměru fází jsou obsahy legujících prvků, zpracování nebo rozpustnost β -stabilizátoru v β fázi. Mezi legury s neomezenou rozpustností patří vanad, molybden, niob a tantal. Tyto materiály mají lepší tvářitelnost než α -slitiny, lepší únavovou odolnost a možnost tepelného vytvrzení. Nevýhodami je horší svařitelnost a nižší lomová houževnatost. Nejvýznamnějším reprezentantem této skupiny je slitina TiAl6V4, která je nejrozšířenějším materiálem vyráběným z titanu. [6],[7],[8],[9]

1.1 Intermetalické slitiny

Titan aluminid se řadí mezi intermetalické slitiny. Intermetalické slitiny jsou tvořeny minimálně dvěma kovy, jejichž mechanické vlastnosti jsou zcela odlišné od vlastností jimi tvořeného intermetalika. Tento druh slitin také obvykle má přesně řazené atomy v krystalické mřížce, což se projevuje na mechanických vlastnostech zvýšením pevnosti a žárupevnosti, nicméně snižuje houževnatost a tažnost. [2],[10]

Intermetalické slitiny titan aluminidu vynikají nízkou hustotou, vysokou pevností a dobrou odolností vůči korozi i tečení. Problémem této slitiny je naopak nízká tažnost a lomová houževnatost za pokojové teploty, což spolu s obtížnou obrobiteľností, zužuje možnosti využití na vysokoteplotní aplikace, kde tyto nedostatky vyvažuje svou žáruvzdorností a žárupevností Titan aluminid se vyskytuje ve třech fázích, kterými jsou Ti_3Al (α_2), $TiAl$ (γ) a $TiAl_3$. [2],[10],[11],[13]

- $TiAl$ (γ) je fáze, která existuje mezi 48,5 až 66 at. % hliníku a přetrvává až do teploty 1443°C. Krystalizuje v tetragonálně plošně středěné mřížce (obr. 3a), která vychází z rozdílu atomových poloměrů hliníku a titanu. Silná vazba mezi titanem a hliníkem má za následek potřebu vysoké aktivační energie při difuzi, což v důsledku vede k vysoké odolnosti vůči tečení a pevnosti, která se zachovává i za vysokých teplot. Materiál v důsledku této vazby vykazuje dobré vlastnosti v oblasti elastické deformace, avšak v oblasti plastické deformace se vyznačuje velmi chabou tažností, která může být při pokojové teplotě pouhé jedno procento. [2],[11],[12]
- Ti_3Al (α_2) je fáze s hexagonální mřížkou DO_{19} s kovalentními směrovými vazbami spojujícími atomy titanu a hliníku (obr. 3b). Nachází se v rozmezí 22 až 39 at. % hliníku s maximálním výskytem do teploty 1179 °C. Jedná se o materiál



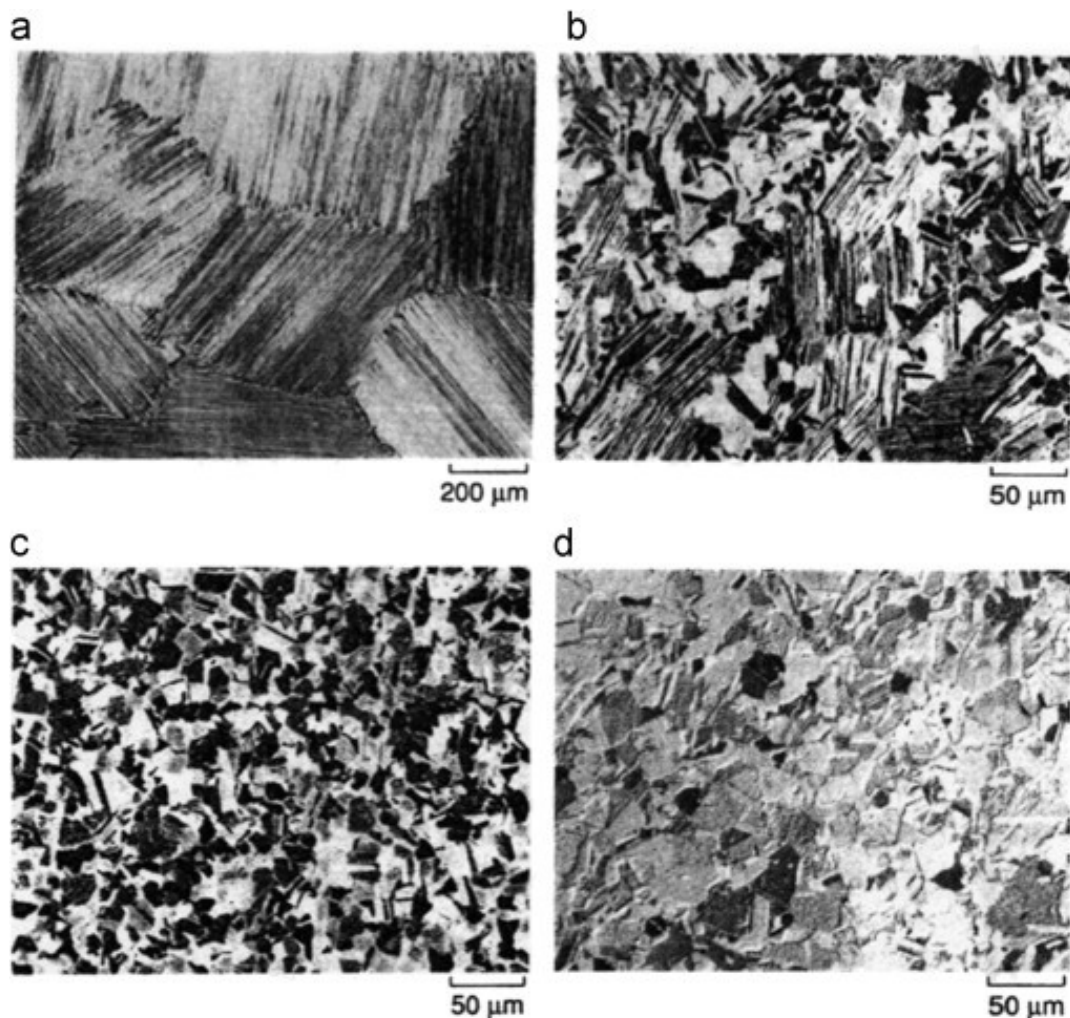
Obr. 3 Krystalické struktury a) γ - $TiAl$ b) α_2 - Ti_3Al [2]

s dobrou žárupevností, avšak závažnou překážkou je vysoká míra absorpce kyslíku a vodíku, a opět nízká tažnost.^{[2],[12]}

- V rozmezí 37 až 49 atomárních procent hliníku existuje duální fáze sestávající ze směsi α_2 a γ fází, která je velmi citlivá na změnu struktury a velikost zrna, avšak mikrolegujícími složkami jsme schopni dosáhnout její stálosti za pokojové teploty. Vyznačuje se tažností do 6 procent, vysokou pevností a žárupevností, srovnatelnou se superslitinami. Creepová a oxidační odolnost je dostačující do teploty 850 °C. Obvyklými legury dvoufázových slitin je malé množství V, Mn, Mo, Hf a Cr, které mají obvykle pozitivní vliv na tažnost.^{[2],[10],[12]}

1.2 Mikrostruktura

Výše zmíněná duální fáze má širokou škálu mikrostruktur v závislosti na tepelném zpracování. Tyto struktury můžeme rozdělit na plně lamelární, téměř lamelární, duplexní a struktury blízké γ . Z těchto struktur vykazují vlastnosti vhodné pro komerční užití duplexní a plně laminární mikrostruktura.^{[2],[13]}



Obr. 4 Mikrostruktury duální fáze titanium aluminidu (a) plně laminární (b) téměř laminární (c) duplexní (d) téměř γ [2]

Plně lamelární struktura (obr. 4a) je dosažitelná pouze pro slitiny do 48 at.% Al, což je nejvyšší hranice výskytu α -fáze. Tepelným zpracováním v oblasti α -fáze a následným zchlazením rychlostí 10 až 50 °C/min na pokojovou teplotu α -fáze precipituje do lamel α_2 , které společně s lamelami γ , vytvoří výslednou mikrostrukturu s velikostí zrn od 200 do 1000 μm . [2],[11],[13]

Duplexní strukturu (obr. 4c) tvoří slitiny s 46 až 50 at.% Al, které jsou žháný v oblasti $\alpha+\gamma$ při vyrovnaném poměru těchto fází a následně ochlazeny na pokojovou teplotu. Výsledná zrna jsou velmi jemná s rozměry 10 až 35 μm při tloušťce jednotlivých lamel od 0,1 do 1 μm . [2],[11]

Téměř lamelární struktura (obr. 4b) je formována z oblasti $\alpha+\gamma$ struktury, při poměru α/γ vyšším než 1. Ochlazováním na teplotu -10 °C rychlostí 10 až 100 °C/min vzniká struktura s většinou lamelárních zrn s lamelami fáze α_2 a γ smíšenými se zrnky γ -fáze. Rozměry zrn ve výsledné mikrostruktuře se pohybují mezi 150 až 200 μm . [2],[13]

Téměř γ struktura (obr. 4d) je žháná blízko eutektické teplotě (1125 °C) v oblasti $\alpha_2+\gamma$ při co nejvyšším poměru γ/α respektive γ/α_2 . Výsledná struktura je tvořena zrnky γ -fáze o velikosti 30 až 50 μm s precipitáty fáze α_2 formovaných na hranicích zrna. [2],[13]

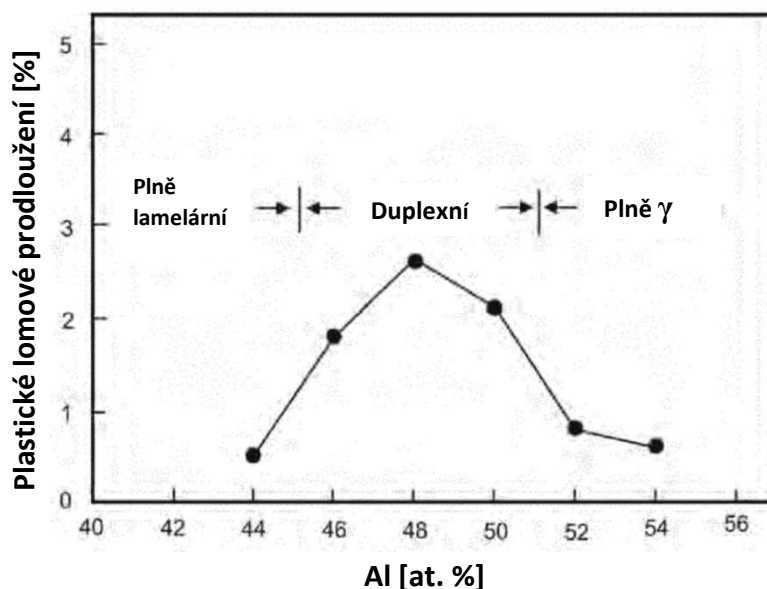
Mikrostruktura	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Plně lamelární	360	400
Téměř lamelární	430	480
Duplexní	440-450	505-538
Téměř γ	387	468

Tab. 2 Mechanické vlastnosti mikrostruktur Ti-46,5Al-2,5V-1Cr [13]

1.2.1 Vliv mikrostruktury na tažnost

Za hranicí 52 at.% Al už se při pokojové teplotě drží pouze plná γ -fáze se zrnky o rozměrech 50 μm . Tyto slitiny se vyznačují extrémně nízkou tažností, kterou se nedaří zlepšit žádnou úpravou struktury ani legováním. Tyto slitiny byly proto shledány nevyužitelnými pro další inženýrské aplikace. [2],[11]

Z grafu závislosti tažnosti na procentuálním zastoupení hliníku (obr. 5) je dobře patrné, že nejvyšší tažnosti u mikrostruktur titan aluminidu dosahujeme v oblasti duplexní struktury v úzkém rozsahu koncentrací mezi 45 a 50 at. %



Obr. 5 Procentuální prodloužení před lomem jako funkce procentuálního zastoupení hliníku v binárních γ -fázích titan aluminidu [11]

Al. Vrchol této závislosti se pohybuje kolem hodnoty 48 at.% Al, kdy slitina má během tepelného zpracování poměr α/γ blízký jedné.^[11]

V duplexní struktuře lze definovat poměr velikosti lamelárních zrn vůči zrnům γ -fáze (L/γ). Poměr L/γ s nejvyšší hodnotou tažnosti se pohybuje v rozmezí od 0,3 do 0,4. Tento poměr je závislý na poměru α_2/γ , který se pro optimální hodnoty pohybuje od 3 do 15 %. Dalšími obecnými faktory ovlivňujícími tažnost jsou velikost zrna, rozměry lamel a množství nečistost materiálu. Obzvláště snížení kyslíku má příznivý vliv na tažnost, kdy například změnou z 800 na 370 ppm dosáhneme zvýšení tažnosti z 2% na 2,7%.^[2]

1.2.2 Vliv mikrostruktury na odolnost proti tečení a únavovou životnost

U duálních struktur titanu je odolnost vůči tečení řízena hlavně zastoupením hliníku. Jeho vyšší zastoupení ve slitině obvykle vede ke zvýšení creepové odolnosti. Pro zlepšení odolnosti vůči tečení je lepší také přítomnost hrubých zrn a plně lamelární struktura, která vykazuje v tomto případě lepší vlastnosti nežli struktura duplexní. Zesílení plně lamelární struktury je dáno přítomností lamel α_2 , které působí jako výztuž.^[2]

Jak již bylo zmíněno výše, problém plně lamelárních struktur je za nízkých teplot, kde vykazují slabou tažnost. Za teplot do 650 °C toto platí i pro creepovou odolnost, kdy je horší nežli u duplexních struktur. Po překročení této hranice ovšem vykazuje plně lamelární struktura lepší odolnost vůči tečení i vyšší pevnost ve smyku.^[2]

Faktory ovlivňující únavovou odolnost jsou vesměs stejné jako faktory ovlivňující odolnost vůči tečení. Za nízkých teplot plně lamelární struktura vykazuje značně pomalejší růst trhliny nežli struktura duplexní. Co se celkové únavové životnosti týče, platí že do teploty 800 °C je nejlepší jemnozrnná duplexní mikrostruktura, zatímco nad touto hranicí je nejvhodnější struktura plně lamelární.^[2]

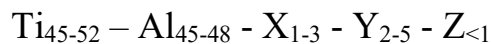
1.2.3 Vliv mikrostruktury na pevnosti

Pevnost v tahu duální fáze titanu je nepřímo úměrná velikosti zrna. Jak již bylo zmíněno výše, struktura s největšími zrnami je struktura lamelární, která také vykazuje nejnižší meze kluzu a pevnosti. Nejvyšší meze kluzu i pevnosti vykazuje duplexní struktura, která má zároveň nejmenší zrna ze všech čtyř zmiňovaných struktur (tab.2).^{[2],[11],[13]}

Se zvyšující se teplotou také můžeme pozorovat anomálie v chování charakteristickém pro intermetalické slitiny. Tato anomálie se projevuje zvyšováním pevnosti spolu s nárůstem teploty, ovšem při překročení určité teploty se pevnost začíná opět snižovat. Toto chování je zapříčiněno uspořádáním atomů a pohybem dislokací. Teplota počátku nárůstu pevnosti se u γ -fáze pohybuje okolo 200 °C s vrcholem mezi 600 až 700 °C. U duálních slitin se poté tento interval zkracuje.^[2]

1.3 Vliv příměsí

Slitiny vhodné pro inženýrské použití mívají 45 až 48 at. % hliníku s příměsí od 1 do 10% minimálně jednoho z následujících prvků: chromu, hořčíku, manganu, niobu, tantalu nebo wolframu. Z těchto možných příměsí je nejvýznamnější niob, který zvyšuje korozní odolnost, a kompenzuje nedostatek nezávislých skluzových systémů v γ -fázi, čímž je slitina více vhodnou pro tváření za tepla. Typicky se obsah niobu ve slitinách TiAl třetí generace pohybuje od 4 do 8 %.^{[11],[13],[14]}



Rov. 1 Zobecněné rozdělení příměsí titan aluminidů do tří základních kategorií [2]

- Do kategorie X spadají prvky, které zvyšují tažnost, ale mívají nepříznivý efekt hlavně na dvojčatění a také snižují energii potřebnou pro tvorbu dislokací. Do této kategorie spadá chrom, mangan a vanad.^[2]
- V kategorii Y jsou prvky zvyšující odolnost vůči tečení a oxidaci. Řadíme sem tantal, wolfram, niob a molybden.^[2]
- Do kategorie Z potom patří bor nebo uhlík. Bor se používá k získávání plně lamelární mikrostruktury s jemnými zrny, což je způsobeno jeho nerozpustností v TiAl tuhém roztoku, kde následně slouží jako překážka v růstu zrna, zatímco uhlík vytváří precipitáty Ti_3AlC , které zvyšují pevnost a odolnost vůči tečení.^[2]

1.3.1 Legování niobem

Jak již bylo zmíněno výše, přidáním niobu dosáhneme především zvýšení odolnosti vůči tečení a oxidaci. V posledních letech bylo vyvinuto mnoho nových slitin, které můžeme rozdělit do následujících čtyř kategorií (tab. 3).^[2]

Ve vývojově starších kategoriích I. a II. byl niob užíván pro jeho podporu tvorby Al_2O_3 , jež ve formě ochranné vrstvy zvyšuje oxidační odolnost a zabraňuje vzniku trhlin. Zároveň niob snižuje rozpustnost kyslíku ve fázi α_2 , která je nejnáchylnější ke křehnutí za vysokých teplot vlivem vysoké rozpustnosti kyslíku a u které je rozpustnost vyšší než u fáze γ .^{[2],[10]}

I.	Ti-48Al-2Nb
II.	Ti-(46-47)Al-(2-3)Nb
III.	Ti-45Al-(5-10)Nb
IV.	Ti-45Al-(5-7)Nb-Žáruvzdorné kovy

Tab. 3 Základní kategorie TiAl slitin legovaných niobem [2]

Je známo, že slitiny s vysokým obsahem niobu (III a IV v tab. 3) vykazují zvýšenou pevnost při vysokých teplotách. To vedlo k nedávnému vytvoření slitin tříd TNB a TNM, kde niob hraje rozhodující roli ve zvýšení pevnosti a odolnosti vůči tečení a oxidaci.^[2]

Atomy niobu nahrazují v krystalické mřížce atomy titanu, čímž snižují podíl hliníku v γ -fázi, tím je hranice fáze α posouvána doleva, což v konečném důsledku vede ke snižování výrobních teplot při výrobě plně lamelárních struktur. Za nižších teplot je také možné dosáhnout lepší tvorby mikrostruktur a jemnějšího zrna, které vykazuje lepší pevnost.^[2]

1.4 Porovnání slitin titanu a superslitin Ni

Titan aluminidy mají oproti superslitinám niklu poloviční hustotu, ovšem mají také velmi nízkou tažnost za pokojové teploty, v čemž naráží při uvedení do širší inženýrské praxe. I přesto zůstává největším problémem pro širší využití aluminidů cena, u které je ovšem předpokládán výrazný pokles zavedením práškové metalurgie, čímž by bylo možné snížit současnou cenu na desetinu. Dalším konkurentem titanu je keramika, která je vhodnější pro aplikace za vyšších teplot. Titan aluminidy jsou tedy hlavně používány pro malé komponenty, kde snížení hmotnosti poskytuje značnou výhodu. [2],[15]

Vlastnost	Slitiny TiAl	Superslitiny Ni
Hustota [gm/cm ³]	3,7-3,9	8,3
Youngův modul za pokojové teploty [GPa]	160-176	206
Modul pružnosti [MPa]	400-630	1000
Pevnost v tahu [MPa]	450-700	1200
Tažnost za pokojové teploty [%]	1-3	15
Limit tečení [°C]	1000	1090
Oxidace [°C]	300-1000	1090

Tab. 4 Porovnání TiAl se superslitinou Ni [2]

2 ODLÉVÁNÍ SLITIN TiAl

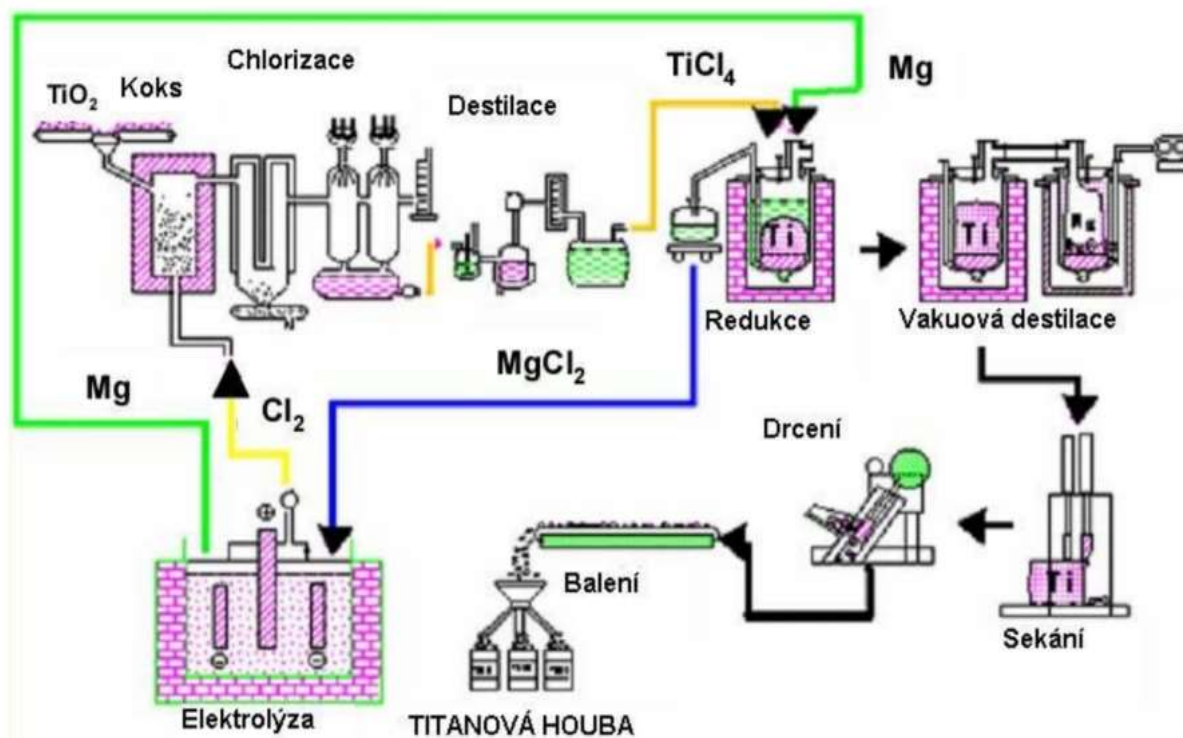
Titan je čtvrtý nejrozšířenější kov v zemské kůře a jeho koncentrace je odhadována na 0,6 % hmotnosti Země. Byl objeven anglickým chemikem Williamem Gregorem roku 1791, nicméně syntetizován byl až roku 1906 M. A. Hunterem. Titan jako konstrukční materiál je využíván zejména v potravinářském a chemickém průmyslu, kde se pracuje s chlorem a jeho sloučeninami, dále je využíván při stavbě lodí pro svoji výbornou odolnost vůči mořské vodě. Jeho zdravotní nezávadnost z něj činí vhodný materiál pro chirurgické nástroje a tělní náhrady a jeho nízká měrná hmotnost je ideální pro aviatiku a kosmický program. V přírodě se vyskytuje přibližně 80 minerálů obsahujících titan. Pro produkci čistého titanu je primární rudou rutil, který má obsah oxidu titaničitého (TiO_2) až 96 %. Druhou a rozšířenější rudou je ilmenit (metatitaničitan železnatý), který má významnější naleziště, vhodná pro masivní povrchovou těžbu, ale nevýhodou ilmenitu je nižší obsah TiO_2 (40-60 %). Tato ruda je nejvíce znečištěna hematitem (Fe_2O_3) nebo magnetitem (Fe_3O_4). Titanové rudy (zejména ilmenit) je třeba obohatit a zbavit nečistot, což má nepříznivý vliv na ceny.^{[6],[8],[13],[16],[17],[18],[19],[20]}

Titan Ti	
Protonové číslo	22
Relativní atomová hmotnost	47,90
Hustota	4,5 g/cm ³
Teplota varu	3130 °C
Teplota tání	1812 °C
Elektronegativita	1,54
Tvrдость	6

Tab. 5 Základní vlastnosti titanu [19]

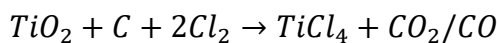
2.1 Krollův proces a výroba ingotu

Kvůli obtížnému zpracování se titan, i přes svoji relativní hojnost, začal používat v průmyslu po konci 2. světové války, kdy byl představen Krollův proces, kterým získáváme z oxidu titaničitého takzvanou titanovou houbu. Krollův proces se skládá z následujících operací.^{[6],[13],[16],[17]}

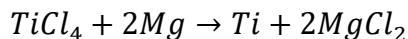


Obr. 6 Krollův proces [17]

- I. Chlorizace a čištění titanové rudy: Chlorizátor je zavážen koksem a oxidem titaničitým. Za přívodu plynného chloru dochází při 900 až 950 °C k reakci, jejímž produktem je chlorid titaničitý. Po zreagování chloru s titanem dochází k destilaci, kdy je dosahováno čistoty $TiCl_4$ 99,9%.^{[16],[17]}



- II. Redukce a vakuová separace: V druhé fázi je chlorid přiveden do nádoby s roztaveným hořčíkem při teplotě 800 až 850°C. Dochází k redukční reakci a tvorbě titanové houby.^{[16],[17]}



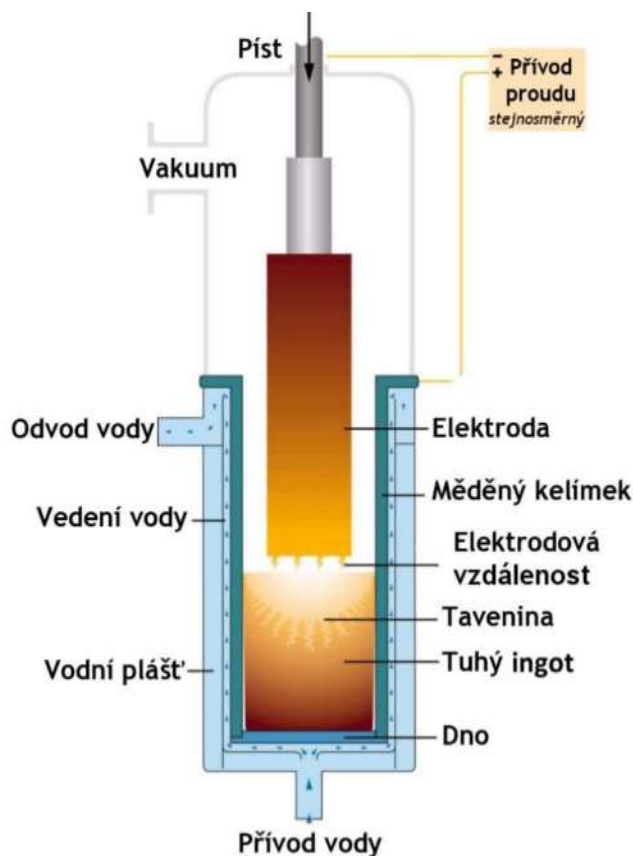
$MgCl_2$ je odveden a elektrolýzou recyklován na chlor a hořčík, který je znovu použit v procesu. Titanová houba je dále zahřívána a v nádobě je snižován tlak vakuovou pumpou, následkem čehož se vypařují zbytky chloridu hořečnatého a dochází ke zvýšení čistoty houby.^{[16],[17]}

- III. Výroba elektrody: Houba je nasekána a nadrcena. Lisováním nadrcené houby smísené s legujícími prvky na hydraulickém 100 tunovém lisu jsou vytvořeny brikety o průměru zhruba 200 mm, které jsou následně v ochranné argonové atmosféře svařovány do elektrody, která je poté dvakrát přetavena ve vakuové obloukové peci. Dvojitě přetavení je nutné z důvodu homogenizace. Zároveň napomáhá snížení znečištění hořčíkem a chlorem vzniklým při Krollově procesu.^{[16],[17],[41]}

Nevýhodou Krollova procesu je vysoká náročnost spjatá s vysokými spotřebami energie a nízkou efektivitou, což se projevuje na ceně, která je největší překážkou používání titanu.^{[6],[13],[16],[17]}

2.2 Metoda VAR

Metoda VAR (vacuum arc remelting) je využita při výrobě prvotního ingotu, která je popsána výše. Jedná se o modifikaci elektrické obloukové pece, kde elektrický oblouk odtavuje konec elektrody, jenž tuhne na vodou chlazeném kelímku a dává vzniknout novému ingotu. Během tavicího procesu je udržováno vysoké vakuum. Struktura vzniknuvšího ingotu je dána teplotním gradientem, který má-li vzniknout usměrněná dendritická struktura, musí být udržován co možná nejrovnoběžněji s elektrodou. Optimálním výsledkem tavby je struktura s dendrity rovnoběžnými k ose ingotu. Avšak i v usměrněném ingotu mohou vznikat vady jako letokruhy, černé a bílé skvrny, které mohou být důvodem pro vyřazení ingotu. Letokruhy jsou nejméně závažnou vadou. Jedná se o jev



Obr. 7 Metoda VAR [21]

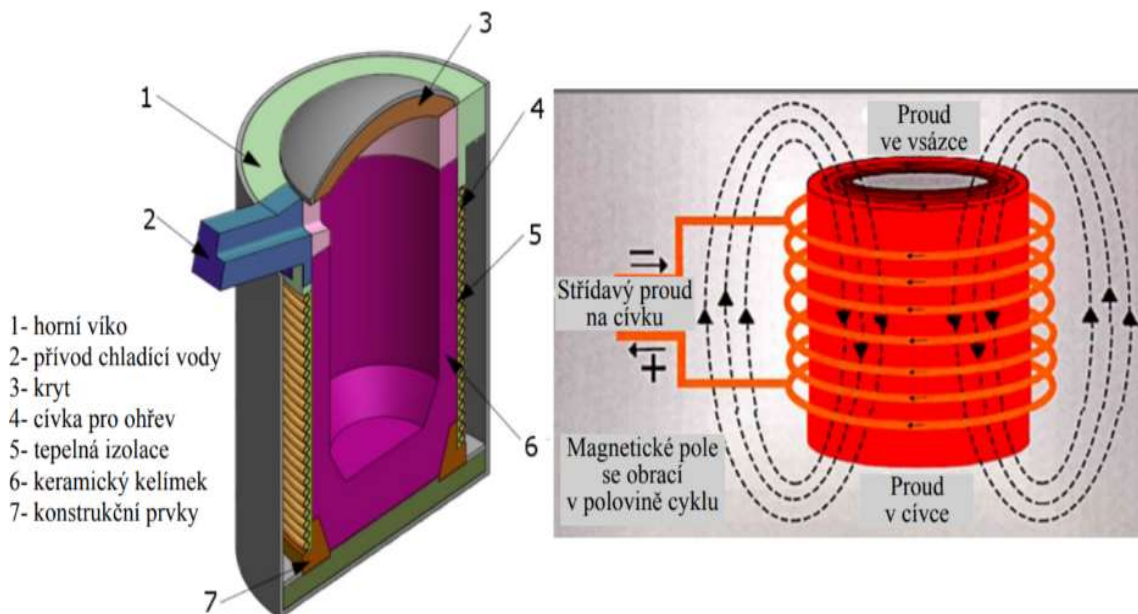
zapříčiněný fluktuací energie, která je u moderních systémů VAR zamezena počítačovým řízením. Závažnějšími vadami jsou skvrny. Černé skvrny jsou oblasti bohaté na karbidy a karbidotvorné prvky. Bílé skvrny jsou oblasti s nízkým obsahem legujících prvků. Obě tyto vady mohou mít závažný vliv na finální produkt. Výhodami procesu VAR je odstranění rozpuštěných plynů, jako je vodík, dusík a oxid uhličitý, snížení obsahu oxidů a nežádoucích stopových prvků s vysokým tlakem par. Nevýhodou je cena výsledných ingotů zapříčiněná zejména cenou výroby elektrod.^{[17],[20],[21]}

2.3 Metoda VIM

Metoda VIM z anglického Vacuum induction melting, tedy vakuové indukční tavení. Jedná se o tavení v indukční peci, kdy je vsázka ohřívána vířivými proudy, vyvolanými střídavým proudem. Indukční tavení je v případě titanu prováděno ve vakuu kvůli vysoké afinitě titanu ke kyslíku, což má příznivý dopad na celkovou čistotu slitiny a během tavby jsou odčerpávány i plyny, které byly rozpuštěny v tuhém roztoku.^[21]

Mezi výhody této metody patří, že střídavý proud vyvolává ve vsázce sekundární magnetické pole, které umožňuje mechanické promíchávání materiálu, což má v konečném důsledku pozitivní efekt na tepelnou i chemickou homogenitu materiálu.^[21]

Vhodnou metodou, jak dosáhnout optimálních teplot, a přitom snížit cenu, při zachování adekvátní kvality výsledného materiálu, se jeví použití žáruvzdorných kelímků. Doposud byly jako materiál pro kelímky používány Y_2O_3 , CaO, ZrO_2 nebo Al_2O_3 . Tyto materiály ovšem vykazují přílišnou reaktivitu v nich obsaženého kyslíku se slitinou, v důsledku čehož dochází ke křehnutí slitiny. Pokud stanovíme hranice maximální kontaminace na 0,1 hm. %, tak se této hranici blíží nejvíce Y_2O_3 společně s CaO. Nedávný výzkum ovšem objevil jako nejvhodnější materiál pro možnou výrobu kelímků směs $BaZrO_3$, ZrO_2 a CaO v molárním poměru 0,46:0,47:0,7.^[22]



Obr. 8 Schéma indukční pece (vlevo) a indukovaných proudů (vpravo) [21]

2.3.1 Metoda ISM

Vakuové tavení ve studeném kelímku (ISM) je prováděno ve vodou chlazeném měděném kelímku, kdy je kov zahříván vířivými proudy vzniklými při průchodu proudu cívkou.^[21]

Oproti metodě VIM je kelímek segmentován na měděné trubky, které jsou chlazeny, díky čemuž se na povrchu kelímku vytvoří ochranná krusta. Tuto krustu je možné udržet díky slabé tepelné vodivosti taveniny, která brání tuhnutí za hranicí krusty.^{[21],[23]}

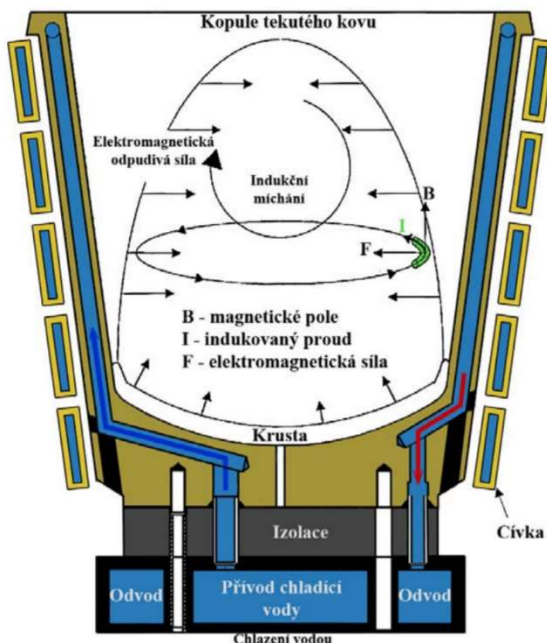
Vlivem segmentace je dosaženo, že vodní smyčky neruší magnetické pole, tak jako by tomu bylo u celistvého kelímku, který by generoval pole opačně orientované. Tento kelímek se označuje jako Tarammův segmentovaný kelímek. Magnetické pole vyvolává elektromagnetické síly, které působí na krustu a taveninu směrem do osy kelímku, následkem čehož se vsázka vzdaluje od kelímku, do tvaru paraboloidu, který potom svým tvarem minimalizuje další kontakt s chlazeným povrchem kelímku (obr. 9).^[23]

Tavení v Tarammově kelímku je vhodné pro malé vsázky do 5 kg. Oproti metodě VAR zde není potřeba žádná elektroda, která bývá vyrobena na míru a vzhledem k velikosti kelímku po natavení vzniká velké množství odpadu. Tarammův proces je oproti tomu schopen pracovat s pouhými odřezky a jediným odpadem je tenká krusta. Zároveň je materiál magnetickým polem dobře homogenizován. Ve výsledném materiálu tak dochází k minimální segregaci, je zajištěna rovnoměrná velikost zrna a eliminována porozita. Lití v Tarammově kelímku je vhodné ve spojení s odstředivým litím.^[23]

2.4 Bezpečnostní problémy

Zpočátku byly problémy bezpečnosti způsobeny nedostatkem znalostí souvisejících s výrobou titanu. Průvodním jevem byly výbuchy způsobené vodíkem. To byl absolutně nový problém. Příčinou byla špatná konstrukce pecí, založená na zkušenostech se zpracováním železa. Problém spočíval v tom, že roztavený titan reagující s vodou absorbuje kyslík a uvolní vodík, který zapříčiní explozi. Jenom během prvních pěti let zpracování titanu si výbuchy pecí vyžádaly šest obětí. Dalšími problémy byly požáry a úniky procesních plynů, které si vyžádaly dalších pět životů.^[24]

Podstata problému s explozí spočívala v tom, že tavení probíhá v měděném kelímku, chlazeném vodou, kde provozní teplota tavby je zhruba o 200 stupňů, nad teplotou tavení titanu, která je 1635 °C, přičemž teplota tavení mědi je 1100 °C. Což znamená, že pokud přestane vodní chlazení ve stěně fungovat, roztavenou stěnou unikne voda, jež zapříčiní dvoufázovou explozi. Nejprve exploduje pára a poté vodík, který vznikne rozpadem vody, zapříčiněným



Obr. 9 Schéma kelímku ISM [21]

vysokou afinitou kyslíku k titanu. Kombinovaná síla těchto explozí byla vyčíslena až na ekvivalent 50 kg TNT. Tento problém se doposud nepodařilo zcela vyřešit. Adekvátní reakcí ovšem bylo řádné proškolení obsluhy, umístění pece do bunkru, ochrana stanoviště obsluhy a odstranění citlivých komponent z oblasti exploze. Časem se do procesu přidala i možnost elektronické kontroly a senzorů v chladícím okruhu. [24]

Častějším problémem než exploze pecí byly požáry, které jsou způsobeny hlavně nezkušeností, nedbalostí či prostým zanedbáním údržby pece a jejího příslušenství. Příkladem může být, že pěti nejzávažnějším požárům v USA v minulém století mohlo být zabráněno, kdyby neselhal lidský faktor. U vzniku požárů je největším rizikem vznícení kovového prachu, který je velmi vznětlivý a hoří s explozivní silou. Ke vznícení přitom stačí pouze malá jiskra vzniklá mechanicky, nebo vybitím statického náboje. Nejlepším způsobem zamezení požáru prachu je sběrač, který ovšem musí být řádně udržován a zanedbání jeho údržby je nejčastější příčinou vzniku zamezitelných požárů. [24]

Posledním typem nehod jsou úniky procesních plynů (dusíku, chloru a ostatních inertních plynů), kde je největším nebezpečím úniky argonu a dusíku, které jsou zcela bez barvy a zápachu a snižují podíl kyslíku ve vzduchu pod únosnou mez. Delší pobyt v prostředí s malým obsahem kyslíku způsobí mdloby a poté smrt. Další kategorií úniku plynů je únik chloru a tetrachloridu titaničitého, který je zdravotně a environmentálně závadný. Při úniku plynů je opět hlavním faktorem liknavost a nedodržení předpisů o bezpečnosti práce. [24]



Obr. 10 Fotografie nehody VAR pece před a po (rok 1955) [24]

Závěrem lze shrnout, že při zpracování titanu není radno podcenit řádné proškolení obsluhy. Zabezpečení pracovního prostoru operátorů pecí a omezení jejich pohybu v nechráněných rizikových prostorách, dále kontrola obsahu kyslíku ve vzduchu a zajištění řádného větrání prostor obsluhy. [24]

2.5 Recyklace titanu

Během procesu odlévání slitin TiAl, jsou běžné velké ztráty materiálu, které jsou dány nutností vtokových soustav, popřípadě náliťků. Vzhledem k vysoké ceně panenské slitiny je velice výhodné recyklovat co největší množství odpadu ze slévárenského procesu, což je ovšem komplikováno velikou afinitou titanu ke kyslíku, jehož přítomnost ve slitině má negativní vliv na vlastnosti slitiny. Kyslík se do slitiny dostává zejména díky kontaktu taveniny se skořepinou během procesu lití a doposud neexistuje technologie, jež by dokázala tomuto negativnímu jevu zabránit. [25],[26]

Z výše zmíněných důvodů je patrné, že během recyklace odpadů je nutné materiál dezoxidovat. První tavba recyklovaného materiálu, probíhá metodou vakuového indukčního tavení (VIM), za použití speciálního keramického obložení. V tomto kroku je možné vstřikování vápníku do taveniny. [25],[26]

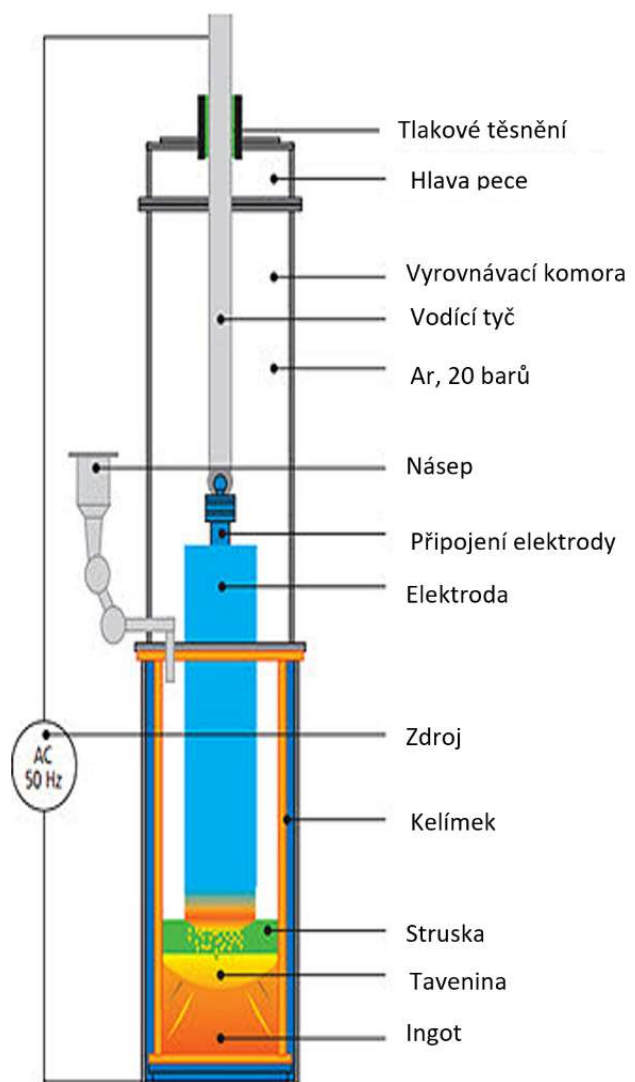


Následným krokem je dezoxidace procesem PESR (tlakové elektrostruskové přetavení), kdy je opakovaně aktivována struska nesoucí sloučeniny vápníku. V této fázi je nutné dodat do pece granule hliníku, popřípadě tantalu, pokud jím byla původní slitina legována, jelikož se tyto prvky váží do strusky a výsledná slitina by byla o tyto prvky ochuzena. Finálním krokem je použití metody VAR, během které jsou ze slitiny vylučovány poslední mikroskopické částičky vápníku a vodíku. [25],[26]

Celý proces rafinace a recyklace klade velké nároky na vybavení, aby bylo možné získat dostatečně čistý ingot titanu aluminidu. Rozvoj technologie recyklace testuje v současné době firma IME, která hlásí velmi dobré výsledky, což je příslibem dalších aplikací TiAl, zlepšením konkurenceschopnosti s ostatními materiály díky poklesu výrobních nákladů odlitků. [25],[26]

2.6 Metody lití

Obecně existují tři metody pro získání konečného výrobku TiAl. Kování, prášková metalurgie a odlévání. Jak již bylo popsáno výše TiAl nevykazuje dobré vlastnosti pro kování ani tváření a prášková metalurgie naráží na limitace při výrobě prášku. Proto se jeví jako nejlepší metodou zpracování lití. Konvenční gravitační lití se ukázalo jako nevhodné kvůli bublinám plynu, které není možno odstranit. Ze škály slévárenských metod se pro TiAl používají hlavně odstředivé lití a antigravitační nízkotlaké lití kam se zařazuje i metoda LEVICAST [27],[28]



Obr 11. PESR pressure electroslag remelting [40]

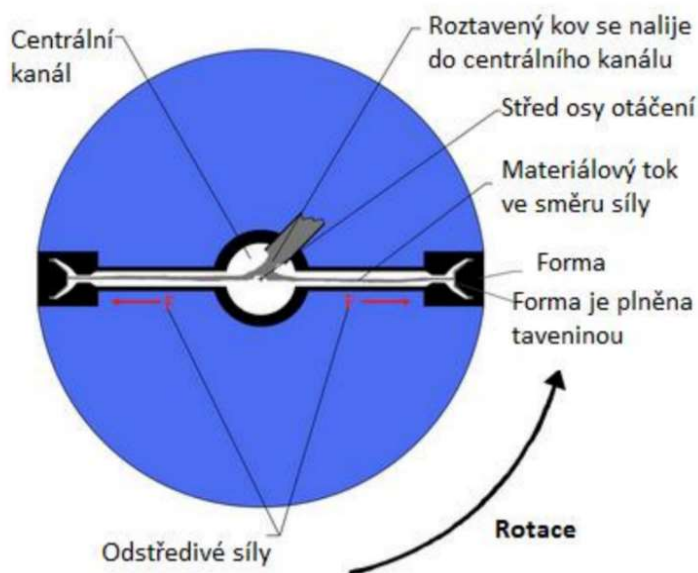
2.6.1 Odstředivé lití

Odstředivé lití je komerčně nejvýhodnější metoda pro produkci ventilů spalovacích motorů. Tato metoda byla shledána nejlepší pro masovou produkci ventilů. Například v Německu bylo roku 2004, počítáno s touto metodou pro výrobu 600 000 ventilů ročně pro automobilový průmysl.^[5]

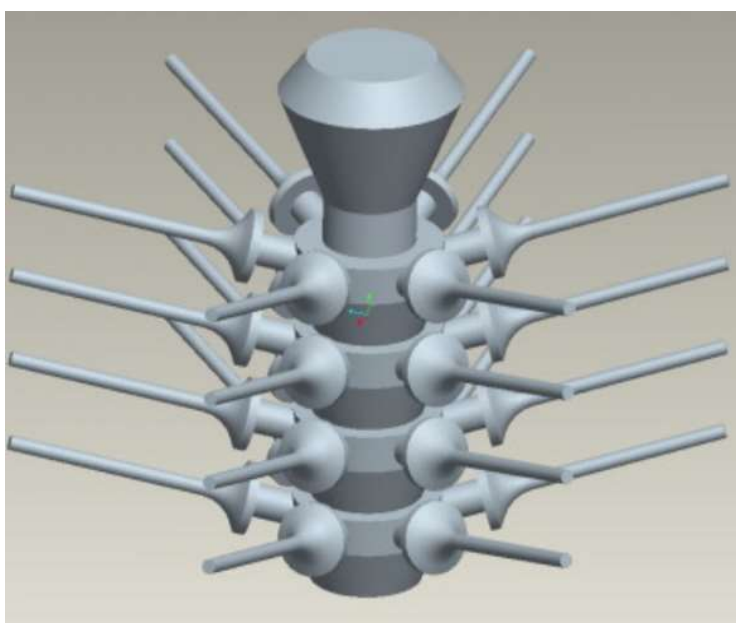
Lití na odstředivce je metodou odstředivého lití, která je vhodná pro odlévání drobných nesymetrických odlitků, nebo těch které by nebylo možné odlévat rotací kolem osy symetrie, jako jsou například ventily spalovacích motorů. Zároveň je tato metoda vhodná pro odlévání odlitků uspořádaných ve stromcích. Lití probíhá centrálním kanálkem a následně po patrech působením odstředivé síly vyplňuje formy jednotlivých výsledných polotovarů. Plnění probíhá v režimu dopředného a zpětného plnění. Výfukové ventily se nejprve plní na povrchu skořepiny táhnoucí se za směrem otáčení. Pokud je tedy plněná dutina příliš dlouhá nebo rychlost plnění příliš nízká může vzniknout mezi dopřednou a zpětnou vrstvou ztuhlá vrstva.^{[27],[29]}

Ventily, které jsou odlity na odstředivce, také vykazují vysokou porozitu směrem ke středu osy ventilu. Vady odlitků jsou ovlivněny procesem plnění formy a procesem tuhnutí odlévaného ventilu.^[27]

Mechanické vlastnosti titan aluminidových slitin není možno optimalizovat dodatečným tepelným zpracováním. Nejideálnějším postupem je proto zvýšení vstupní teploty roztaveného kovu a zvýšení rychlosti celkového plnění formy. Nejvyšší jakosti odlitků bývá dosaženo při teplotě taveniny 1690-1720 °C a frekvenci otáčení 400 až 450 otáček za minutu.^[27]



Obr 12. Odlévání na odstředivce [29]

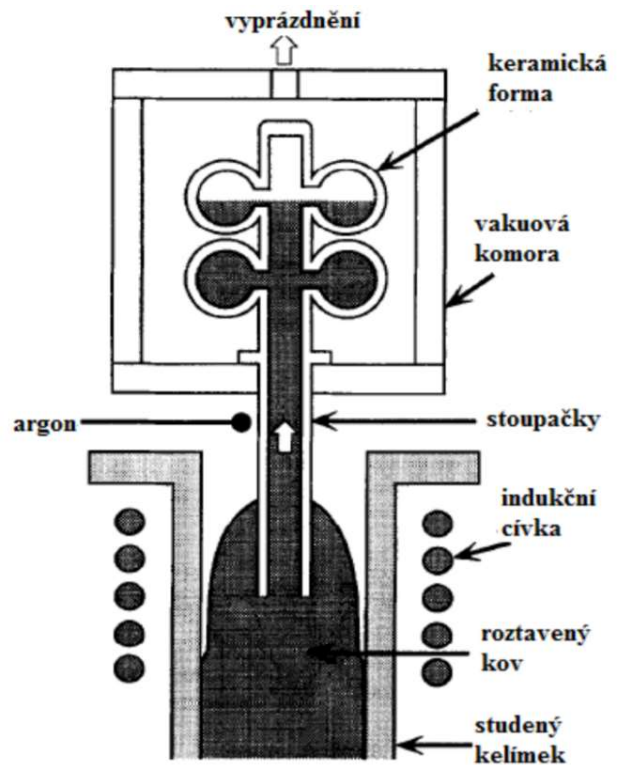


Obr 13. Uspořádání ventilů při lití na odstředivce [27]

2.6.2 LEVICAST

Odlévací metoda LEVICAST je metodou vyvinutou firmou Daido Steel, která se skládá z tavení ve studeném kelímku a nízkotlakého antigravitačního lití. Titan aluminid je taven ve vodou chlazeném měděném kelímku v ochranné atmosféře vysokofrekvenčním indukčním ohřevem, podobně jako tomu je u výše zmíněné metody ISM. Tato metoda je vhodná jak pro hromadnou výrobu ventilů, tak pro výrobu lopatkových kol turbodmychadel. Další z výhod této metody je i možnost odlévání tenkých stěn ^{[1],[31]}

Odlévací skořepiny tvořena keramikou na bázi zirkonu je plněna taveninou, která je hnána tlakem argonu. I přesto, že tavení probíhá v ochranné atmosféře, dochází k reakci se skořepinou formy, při které je odlitek znečištěn kyslíkem. Výsledný materiál dosahuje úrovně kyslíku pouze 500 ppm, která je velmi nízká ve srovnání s ostatními metodami a výsledný produkt tak nevykazuje závažné zhoršení mechanických vlastností.^[1]



Obr 14. Schématické znázornění procesu LEVICAST ^[30]

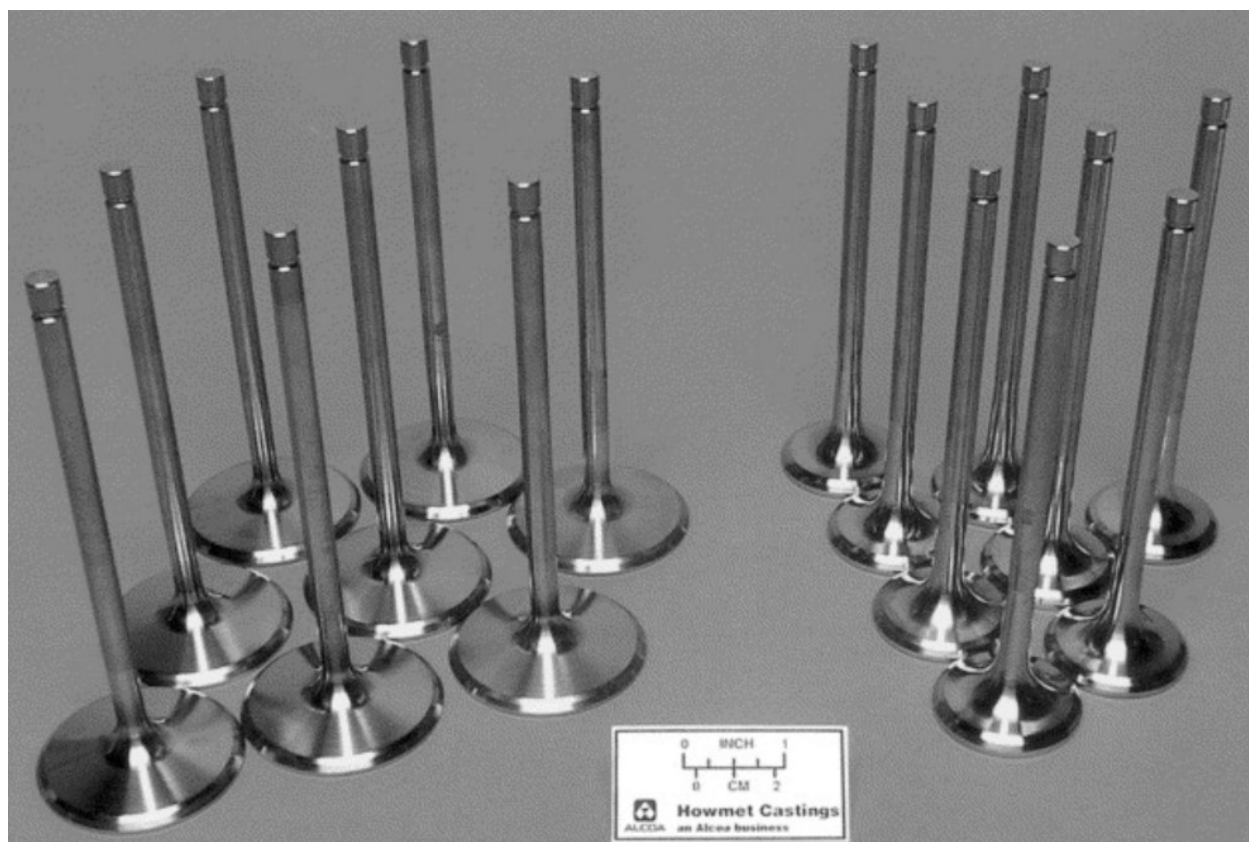
3 APLIKACE V SOUČASNÉ TECHNICKÉ PRAXI

Jak již bylo zmíněno výše, titan aluminidy poskytují atraktivní mix vlastností, a to i navzdory nízké tažnosti, která brání širokému využití pro konstrukci struktur. Možnost zásadní váhové úspory skýtající jejich užití u leteckých motorů byla poprvé zkoumána letectvem Spojených států, zhruba před třiceti lety. První komerční aplikace se titan aluminidy dočkaly roku 1999 v turbodmychadle Mitsubishi Lancer 6. Brzy na to následovaly ventily pro vozy Formule 1, které už jsou dnes ovšem předpisy FIA zakázány. Nicméně tyto ventily jsou nadále používány pro sériově vyráběné vozy. Prozatím poslední oblast aplikace byla představena roku 2011 firmou GE Aviation v leteckém motoru GENx™.^[32]

3.1 Ventily spalovacích motorů

U ventilů spalovacích motorů, je zásadní vlastností dobrá tepelná a korozní odolnost. Pracovní teplota výfukových ventilů je až 900 °C. Před využitím titan pro výrobu ventilů, se používaly Inconely a oceli, které ovšem mají téměř dvojnásobnou hmotnost. Hlavním důvodem užití titan aluminidu je tedy především jeho nízká měrná hmotnost.^{[4] [33], [34]}

Benefity snížení hmotnosti ventilů se projevují hlavně na zvýšení maximálních otáček motoru, kdy nahrazením původních ventilů titaniem aluminidem došlo ke zvýšení maximálních otáček z 6000 na 6900 otáček za minutu. Testy ukazují, že nahrazením ocelových ventilů a zvýšením počtu otáček dosáhneme zvýšení výkonu až o 8 %. Dalších výhod je možné dosáhnout stechiometrickými systémy pro řízení spalování.^{[4] [33] [34]}



Obr 15 γ -TiAl odlitky výfukových ventilů [4]

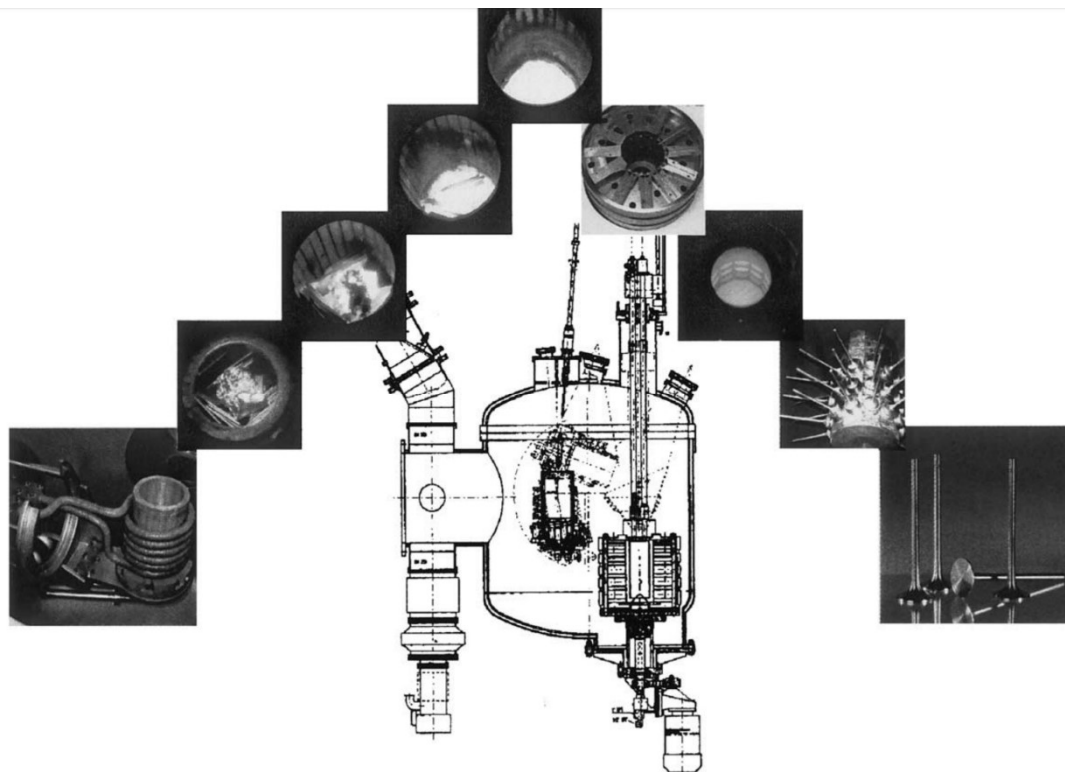
3.1.1 Proces sériové výroby ventilů

Pro masovou výrobu automobilových ventilů byla vybrána slitina Ti-48Al-1Cr-0,2Si, která vyhovuje všem požadavkům ze strany výrobců ventilů (tab.6) a zdárně prošla pětiset hodinovým testem v motoru BMW při 6500 otáčkách za minutu na plný výkon.^[5]

Vlastnost	Požadavky výrobců	Ti-48Al-1Cr-0,2Si
Pevnost v tahu [Mpa]	≥ 500	525
Mez kluzu [MPa]	≥ 350	450
Prodloužení [%]	≥ 1	3,5
Pevnost při 800 °C [MPa]	≥ 165	350
Mez únavy při 10^7 cyklech [MPa]	≥ 250	300
Creepová odolnost po 1000 h při 800 °C [MPa]	≥ 50	170
Koeficient tepelné roztažnosti [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]	< 25	11,7

Tab. 6 Porovnání mechanických vlastností Ti-48Al-1Cr-0,2Si s požadavky kladenými výrobcí [5]

Hlavními aspekty stojícími za úspěšným procesem sériového lití ventilů je zapojení tavení ve studeném kelímku a následné odlévání na odstředivce do předehřáté trvalé kovové formy udržované ve vakuu. Forma je ocelová s výjimkou dutin kolem ventilu, jenž jsou vyráběny z niobu. Na obrázku 16 je zleva doprava znázorněn celý proces. Počátečním krokem je tavení ve studeném kelímku, kde je vsázka tvořena titanem ve formě houby nebo recyklovaného šrotu a hliníkem ve formě ingotů. Dále je možno přidávat legury, kterými jsou chrom, niob nebo křemík. Tavenina je během tavení ve studeném kelímku chemicky a tepelně homogenizována, jak bylo popsáno výše v kapitole 2.3.1. Následuje odlévání v odstředivce. Výsledným produktem metalurgického procesu je lící stromek, který je obráběn do podoby jednotlivých ventilů.^[5]



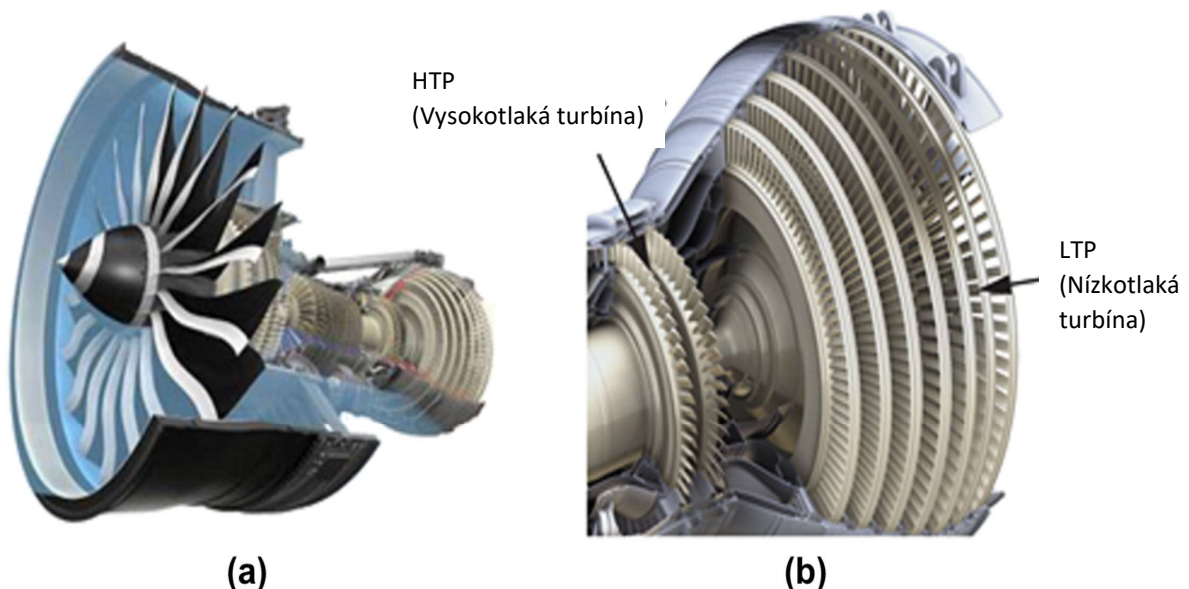
Obr 16. Schématické zobrazení celého procesu [5]

3.2 Turbíny leteckých motorů

U leteckých motorů se titan aluminid využívá zejména jakožto materiál lopatek nízkotlaké turbíny. Tyto lopatky byly poprvé implementovány firmou GE Aviation, pro motor GENx™, který je používán pro letouny Boeing 787 Dreamliner, nebo jimi lze osadit starší letadla Boeing 747 Jumbojet, které se již v současnosti nevyrábí. Za zmínku také stojí, motor PW1100G™ od firmy Pratt and Whitney a i poslední z velké trojky Rolls Royce osadil tyto lopatky v motorech Advance™ a UltraFan™. Tyto kroky jasně ukazují velký zájem o slitiny titan aluminidu, ze strany leteckého průmyslu. [32]

Proudové motory firmy GE Aviation obsahují lopatky, ze slitiny Ti-48Al-2Nb-2Cr at. %, odlévané odstředivým litím. Prozatím jsou tyto lopatky používány pouze pro šestou a sedmou úroveň nízkotlaké turbíny, kde nahradily niklové slitiny. Využití titan aluminidu v nízkotlaké turbíně nahrává jeho nízká měrná hmotnost, která má tak přímo vliv na moment setrvačnosti celého lopatkového kola. Ruku v ruce s dobrou creepovou a korozní odolností do 800°C. Tyto motory poté vykazují, oproti předchozí třídě motorů úsporu paliva až 20%, snížení hluku o 50% a redukci emisí oxidů dusíku až o 80%, což je velká výhoda při současném tlaku na environmentální aspekty letecké dopravy. [32]

Pro srovnání Pratt and Whitney používá slitiny Ti-43,5Al-4Nb-1Mo-0,1B At.%, pro poslední ze tří řad LPT lopatek, motoru PW1100G™, osazených v novém Airbusu A320 Neo. Tento letoun má o 15 % procent nižší spotřebu a o 55 % nižší emise oxidů dusíku. Zvláštností motoru PW1100G™ je také užití planetární převodovky s poměrem 1:3, která mění poměr otáček mezi dmychadlem a turbínou. Turbína tak dosahuje až 11 500 otáček za minutu, což je dvojnásobek rychlosti předešlé generace motorů užívaných pro letadla Airbus A320. Zásadní efekt je hlavně snížení hluku, který je nižší až o 20dB. To vše bylo umožněno nahrazením niklových slitin titan aluminidem. [32],[35]

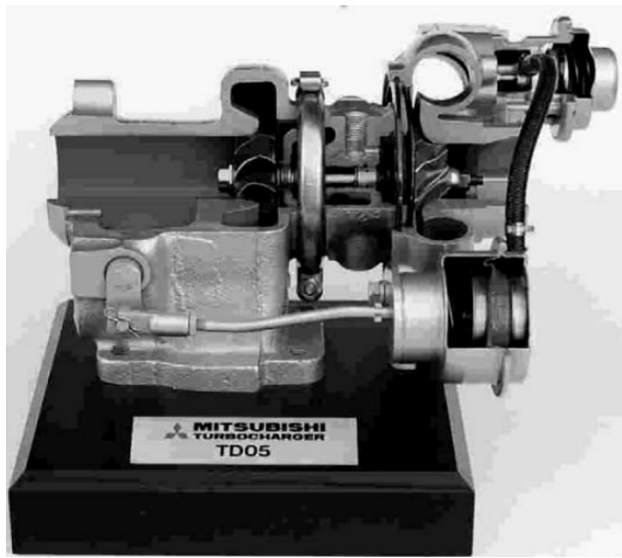


Obr 17. Průřez motorem GENx™ (a); detail sedm řad lopatek LPT (b) [36]

3.3 Turbínová kola turbodmychadel

Turbodmychadlo u osobních vozů lze považovat za jeden ze zásadních nástrojů, jak zvýšit výkon a účinnost spalovacích motorů. Zlepšením účinnosti zároveň optimalizujeme spotřebu paliva, čímž přímo snížíme emise vozu.^{[37], [38]}

První turbodmychadlo využívající komponenty odlité z titanium aluminidu bylo TS05 (obr. 17) vestavěné do sériově vyráběného vozu Lancer Evolution VI, uvedeného na trh roku 1999 firmou Mitsubishi Motors corp. Zároveň bylo i součástí speciálu, jenž vyhrál téhož roku mistrovství světa v rallye.^[38]

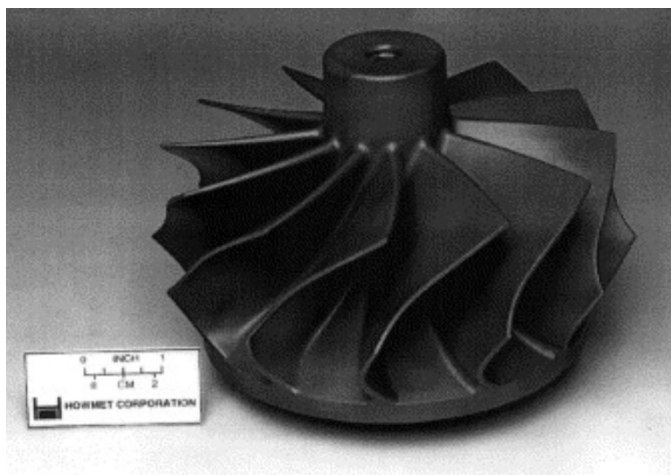


Obr 18. Turbodmychadlo TS05 [38]

Turbodmychadlo funguje na principu propojení dvou lopatkových kol na jedné hřídeli. Soustava je roztáčena tlakem horkých výfukových plynů vystupujících z válce motoru do přívodu kola turbíny, která přes hřídel roztáčí kolo kompresoru plnicí válec. Výsledkem je, že při stejných otáčkách mají přeplňované motory větší hmotnost vzduchu a paliva při stejném objemu válce.^{[37], [38]}

Důvodem využití γ -TiAl pro výrobu turbínových kol je jeho nízká hustota a zároveň dobrá tepelná odolnost. Turbínové kolo je vystaveno výfukovým plynům o teplotě až 850 °C, což zužuje výběr materiálu na super slitiny na bázi niklu o takřka dvojnásobné hustotě nebo na keramiku, kterou není možno obrábět do optimálního tvaru.^[38]

Snížení hmotnosti má přímý vliv na snížení momentu setrvačnosti, jehož pokles umožňuje zvýšení akcelerace soustavy turbodmychadlových kol. Požadavky na turbodmychadla přitom kladou nároky na co nejrychlejší odezvu, mezi okamžikem rozběhnutí motoru a dosažení požadovaného přetlaku přeplňování, který je zhruba 50kPa. Užitím titanium aluminidu lze dosáhnout tohoto přetlaku o 0.2 sekundy dříve, než při aplikaci standardně užívaných Inconelů.^[38]



Obr 19. Turbínové kolo odlité z γ -TiAl [4]

ZÁVĚR

Titanium aluminidy v současnosti nejsou hojně využívány. Jejich aplikace je spojena s řadou problémů, jako je nízká tažnost a vysoká cena výsledných odlitků. Ta je dána náročností zpracování spjaté především s vysokou afinitou ke kyslíku. Proto je důležité všechny procesy provádět ve vakuu případně v ochranné argonové atmosféře. Zároveň je zúžen výběr keramických forem, které by mohly slitinu kyslíkem kontaminovat. V neposlední řadě je problém špatná zabíhavost, která vylučuje většinu nejlevnějších slévárenských metod. Většinu těchto problémů by bylo možno řešit práškovou metalurgií, která je v současnosti předmětem výzkumu. Další možností jak, snižovat cenu je i rozvoj recyklace.

Na druhou stranu titan aluminid vykazuje dobrou odolnost vůči tečení a oxidaci, což v kombinaci s nízkou hustotou a dobrou tepelnou odolností, činí titan aluminid dobrou volbou pro aplikace zejména v rotačních součástech strojů a ventilů, pracujících za vysokých teplot.

Jak je možno vyvodit ze stávajících aplikací, využití titan aluminidu je klíčové pro snížení spotřeby a tím i emisí, jak v letecké, tak v automobilové dopravě. Na místech, kde není možné využívat keramiku, je široké pole pro užití titanium aluminidu. Můžeme se tedy domnívat, že rostoucí tlaky na environmentální dopady dopravy pomohou upozadit cenovou a procesní náročnost v honbě za optimalizací spotřeby a emisí. Nejvíce patrný je tento vývoj v letecké dopravě, kde všichni velcí výrobci leteckých motorů už určitou měrou titanium aluminid do svých výrobků zakomponovali. Vzhledem k tomu, že letecká doprava je zároveň pod největším tlakem veřejnosti na snížení emisí, je velmi pravděpodobné, že aplikace titanium aluminidu v letecké dopravě bude do budoucna rozšiřována.

- [1] NODA, T, Application of cast gamma TiAl for automobiles. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 1998, **6**(7), 709-713 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/S0966-9795(98)00060-0. ISSN 0966-9795.
- [2] KOTHARI, K, R RADHAKRISHNAN a N WERELEY. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. Elsevier, 2012, **55**(1), 1-16 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.04.001. ISSN 0376-0421.
- [3] KRAUSE, D a P BARTOLOTTA. Titanium Aluminide Applications in the High Speed Civil Transport - NASA/TM-1999-209071. *NASA/TM-1999-209071* [online]. 1999, , 1-9 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/19990047462>
- [4] LORIA, E A, Quo vadis gamma titanium aluminide. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2001, **9**(12), 997-1001 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/S0966-9795(01)00064-4. ISSN 0966-9795. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0966979501000644>
- [5] BLUM, M, G JARCZYK, H SCHOLZ, S PLEIER, P BUSSE, H J LAUDENBERG, K SEGTRUP a R SIMON. Prototype plant for the economical mass production of TiAl-valves. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2002, **329**, 616-620 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01513-1. ISSN 0921-5093
- [6] ZHECHEVA, A, W SHA, S MALINOV a A LONG. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2005, **200**(7), 2192-2207 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.115. ISSN 0257-8972.
- [7] DONACHIE, M J, Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004, vii, 381 s. ISBN 08-717-0686-5.
- [8] FIŠARA, Š, *Vliv tepelného zpracování na mikrostrukturu slitiny TiAl6V4*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016, 43 stran + 1 CD-ROM. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [9] BÁRTKOVÁ, D, *Vysokocyklová únava titanové slitiny Ti6Al4V*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [10] ULICHOVÁ, A, *Intermetalika a uspořádané fáze v konstrukčních materiálech*. Brno, 2006. 44 s. Masarykova univerzita. Vedoucí bakalářské práce Doc. RNDr. Jiří Sopoušek, CSc.
- [11] CAMPBELL, F C, *Lightweight Materials: Understanding the Basics*. Materials Park: ASM International, 2012. ISBN 9781615039906.
- [12] *Calculation of Phase Diagrams using the CALPHAD Method* [online]. USA: Computational Thermodynamics., 2011 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.calphad.com/titanium-aluminum.html>
- [13] FROES, F H, *Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications*. Materials Park: A S M International, 2015. ISBN 9781627080798.

- [14] CHLUPOVÁ, A, M HECZKO, K OBRTLÍK, J POLÁK, P ROUPCOVÁ, P BERAN a T KRUML. Mechanical properties of high niobium TiAl alloys doped with Mo and C. *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2016, **99**, 284-292 [cit. 2020-05-17]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.079. ISSN 0264-1275.
- [15] TETSUI, T, Gamma Ti aluminides for non-aerospace applications. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* [online]. Elsevier, 1999, **4**(3), 243-248 [cit. 2019-03-21]. DOI: 10.1016/S1359-0286(99)00023-6. ISSN 1359-0286.
- [16] NAKAMURA, K, T IIDA, N NAKAMURA a T ARAIKE, Titanium Sponge Production Method by Kroll Process at OTC. *Materials Transactions* [online]. Japan Institute of Metals (JIM), 2017, **58**(3), 319-321 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.2320/matertrans.MK201634. ISSN 13459678.
- [17] ŠUPÁLEK, M, *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009. ISBN 20023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV ZEMČÍK, CSc.
- [18] PTÁČEK, L, *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] SEDLÁČEK, V, *Titan a jeho slitiny: Výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 206 s. ISBN 669.285.
- [20] WU, X, Review of alloy and process development of TiAl alloys. *Intermetallics* [online]. 2006, **14**(10-11), 1114-1122 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1016/j.intermet.2005.10.019. ISSN 09669795.
- [21] LOSERTO VÁ, M, *Technologie speciálních slitin* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská TU, 2013 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/07_Technologie_speciálních_slitin/Losertova_Technologie_speciálních_slitin.pdf
- [22] CHEN, G, J KANG, B LAN, P GAO, X LU a Ch LI, Evaluation of Ca-doped BaZrO₃ as the crucible refractory for melting TiAl alloys. *Ceramics International* [online]. Elsevier, 2018, **44**(11), 12627-12633 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.04.061. ISSN 0272-8842.
- [23] BROIHANNE, G a J BANNISTER, Using cold-crucible melting for titanium precision castings. *JOM* [online]. New York: Springer-Verlag, 2000, **52**(5), 21-23 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1007/s11837-000-0026-z. ISSN 1047-4838.
- [24] 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. 2019-03-23]. DOI: 10.1007/s11837-000-0024-1. ISSN 1047-4838.
- [25] 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. 2019-03-25]. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.11.015. ISSN 0966-9795.

- [26] SPIESS, P, M BARTOSINSKI, T STOYANOV, J AGUILAR, B FRIEDRICH a P SPIESS, A Closed-Loop Recycling Technology for gamma -TiAl from Precision Cast Low Pressure Turbine Blades. *Chemie-Ingenieur-Technik: Verfahrenstechnik, Technische Chemie, Apparatewaren, Biotechnologie* [online]. 2015, **87**(11), 1580-1588 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1002/cite.201500063. ISSN 0009-286X.
- [27] FU, P X, X H KANG, Y C MA, K LIU, D LI a Y Y LI, Centrifugal casting of TiAl exhaust valves. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2008, **16**(2), 130-138 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1016/j.intermet.2007.08.007. ISSN 0966-9795.
- [28] LIU, K, Y C MA, M GAO, G B RAO, Y Y LI, K WEI, X WU a M H LORETTO, Single step centrifugal casting TiAl automotive valves. *Intermetallics* [online]. Elsevier, 2005, **13**(9), 925-928 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1016/j.intermet.2004.12.004. ISSN 0966-9795.
- [29] ŽANDA, M, Výroba odlitků z železných a neželezných slitin odstředivým litím. Brno, 2017. 39s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce Ing. Petr Cupák, Ph.D.
- [30] KOKEŠ, J, *Slitiny na bázi titanu pro aplikace v automobilovém průmyslu*. Ostrava, 2012. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Losertová Monika.
- [31] ZHANG, S, J LI, H KOU, J YANG, G YANG a J WANG, Numerical modeling and experiment of counter-gravity casting for titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2016, **85**(5-8), 1877-1885 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1007/s00170-015-8167-y. ISSN 0268-3768.
- [32] BEWLAY, B. P, S NAG, A SUZUKI a M. J WEIMER, TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Materials at High Temperatures: High Temperature Materials for Aerospace Applications* [online]. Taylor & Francis, 2016, **33**(4-5), 549-559 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1080/09603409.2016.1183068. ISSN 0960-3409. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09603409.2016.1183068>
- [33] DIXON, Ch, "Use of gamma titanium aluminide for automotive engine valves." *Metallurgical Science and Technology* 18.1 (2000).
- [34] MAKI, K, A EHIRA, M SAYASHI, T SASAKI, T NODA, M OKABE a S ISOBE. Development of a High-Performance TiAl Exhaust Valve. *JOURNAL OF MATERIALS & MANUFACTURING*. SAE International, 1996, **1996**(105), 321-329. ISSN 0285-5240.
- [35] FROES, F H, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. San Diego: Elsevier, 2019. ISBN 9780128140635.
- [36] General Electric "GENx" 1b Engine Rebuild/Up-Res. *Mike James media TM: 3D modeling for concept visualization, advertasing, animation, machining and training* [online]. 2014 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: www.mikejamesmedia.com
- [37] I. *AutoZnalosti: Víme o je pod kapotou* [online]. 2020, 06.10.2008 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>

[38] TETSUI, T, Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2002, **329-331**(C), 582-588 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01584-2. ISSN 0921-5093.

[39] STEHLÍK, J, Motory TSI se zbaví rozvodných řetězů, neosvědčili se. In: *Idnes* [online]. Praha: MAFRA, 2012, 19. listopadu 2012 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/problemy-motoru-tsi.A121111_220546_automoto_fdv

[40] The Pressure Electroslag Remelting Process (PESR). In: *Total materia: La base de données sur les Matériaux la plus complète au monde* [online]. 2016, leden 2016 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z:

<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=FR&NM=461>

[41] HENRIQUES, V A R, Titanium production for aerospace applications. *Journal of aerospace technology and management* [online]. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, 2009, **1**(1), 7-17 [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.5028/jatm.2009.01010717. ISSN 1984-9648. Dostupné z: <https://doaj.org/article/8b15fb1235314e86a75eaf85fde6fdb6>

Seznam obrázků

Obr.1 Model ventilů ve čtyřválném spalovacím motoru [39]	9
Obr 2 Ti-Al fázový diagram [12]	10
Obr 3 Krystalické struktury [2]	11
Obr 4 Mikrostruktury [2].....	12
Obr.5 Procentuální prodloužení před lomem [11]	13
Obr 6 Krollův proces [17]	17
Obr 7 Metoda VAR [21]	18
Obr 8 Schéma indukční pece [21]	19
Obr.9 Schéma kelímku ISM [21]	20
Obr 10 Fotografie nehody VAR pece [24].....	21
Obr 11 Metoda PERS [40]	22
Obr 12 Odlévání na odstředivce [29]	23
Obr 13 Uspořádání ventilů při lití na odstředivce [27]	23
Obr 14 Schématické znázornění procesu LEVICAST [30]	24
Obr 15 γ -TiAl odlitky výfukových ventilů [4].....	25
Obr 16 Schématické zobrazení celého procesu [5]	26
Obr 17 Průřez motorem GENx TM [36].....	27
Obr 18 Turbodmychadlo TD05 [38]	28
Obr 19 Turbínové kolo odlité z γ -TiAl [4].....	28

Seznam tabulek

Tab.1 Nejběžnější stabilizátory [6]	10
Tab.2 Mechanické vlastnosti mikrostruktur Ti-46,5Al-2,5V-1Cr [2].....	13
Tab.3 Základní kategorie TiAl slitin legovaných niobem [2].....	15
Tab.4 Porovnání TiAlse superslitinou Ni [2]	16
Tab.5 Základní vlastnosti titanu [19]	17
Tab.6 Porovnání Ti-48Al-1Cr-0,2Si s požadavky výrobců [5].....	26