

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**MATERIÁLY POUŽÍVANÉ VE FIRMĚ HONEYWELL
AEROSPACE OLOMOUC A JEJICH
CHARAKTERISTIKY VE VZTAHU NA VÝROBNÍ
PROCESY**

THE MATERIALS USED IN HONEYWELL AEROSPACE OLOMOUC AND THEIR
CHARACTERISTICS IN RELATION TO MANUFACTURING PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Robin Byrtus

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Robin Byrtus**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc a jejich charakteristiky ve vztahu na výrobní procesy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu konstrukčních materiálů, které jsou používány při výrobě leteckých motorů ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc. Zhodnocení výhod i nevýhod těchto materiálů a perspektiva jejich použití.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše dané problematiky

Definice požadavků na materiály používané v letectví

Zpracování přehledu konstrukčních materiálů, které jsou používány při výrobě leteckých motorů ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc

Diskuse výsledků

Zhodnocení výhod i nevýhod těchto materiálů a perspektiva jejich použití

Seznam literatury:

Askeland, D.R., Phulé, P.P: The Science and Engineering of Materials, Fifth Edition, Thompson Canada Limited, Toronto, 2006, ISBN 0-534-55396-6

Callister, W.D.Jr.: Materials Science and Engineering, Sixth Edition, John Wiley and Sons, USA, 2003, ISBN 0-471-22471-5

Matthew, J., Donachie, J.: Titanium – a Technical Guide of Materials, Park, Ohio, 2009, 978-0-871-0-686-7

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá materiály, které se používají ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc při výrobě statických částí leteckých motorů.

První část práce definuje požadované vlastnosti materiálů, používaných v leteckém průmyslu, řeší tepelné zpracování, chemické složení a také strukturu. V další části jsou vybrány některé materiály, které se ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc používají. Předmětem řešení je zhodnocení výhod i nevýhod těchto materiálů, vliv vlastností materiálů na výrobní procesy, perspektiva jejich použití.

Klíčová slova

Materiály v leteckém průmyslu, superslitiny, žárovevné, žáruvzdorné materiály, kompozity

Abstract

This bachelor's thesis deals with materials that are used at Honeywell Aerospace Olomouc in the production of static aircraft engine parts.

The first part both defines the required attributes of materials used in the aerospace industry and deals with thermal processing, chemical composition and structure. In the next part, there are selected some materials that are used at Honeywell Aerospace Olomouc. The aim of the thesis is to evaluate the advantages and disadvantages of these materials, as well as influence of the materials attributes on production processes and the prospect of their use.

Key words

Materials used in the aerospace industry, superalloys, creep resisting steels, heat resisting materials, composites

Bibliografická citace

BYRTUS, R. *Materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc a jejich charakteristiky ve vztahu na výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc a jejich charakteristiky ve vztahu na výrobní procesy jsem vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně

.....

Robin Byrtus

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Věchtovi, CSc. a také panu Ing. Branislavu Domkovi, za veškerou pomoc, vstřícnost, odbornou pomoc s řadou cenných rad a připomínek, které mi pomohly vypracovat tuto bakalářskou práci.

Obsah

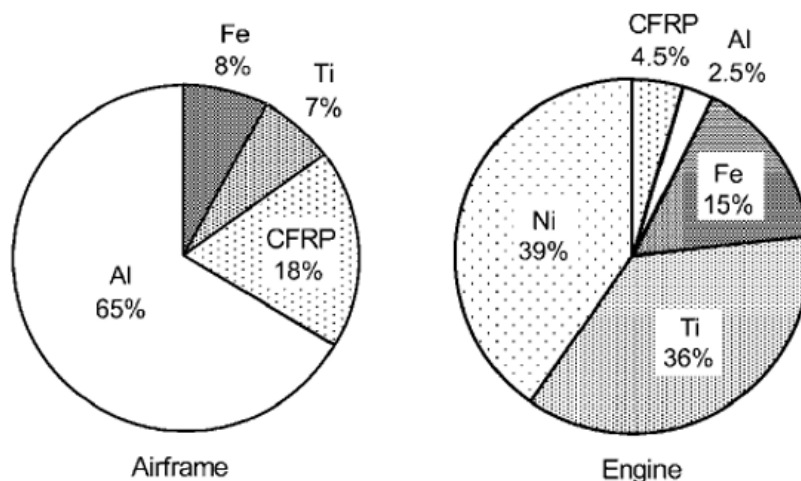
1. Úvod.....	10
2. Cíle práce	11
3. Charakteristiky konstrukčních materiálů	12
3.1 Fyzikální vlastnosti materiálů	12
3.2 Mechanické vlastnosti materiálů	13
3.3 Chemické vlastnosti materiálů	14
3.4 Technologické vlastnosti materiálů.....	15
4. Tepelné zpracování	16
4.1 Tepelné zpracování oceli.....	17
4.2 Tepelné zpracování hliníku	18
4.3 Tepelné zpracování niklu	19
4.4 Tepelné zpracování titanu	20
5. Chemické složení a struktura	21
5.1. Železo a jeho slitiny	21
5.2 Hliník a jeho slitiny	22
5.3. Nikl a jeho slitiny	23
5.4 Cobalt a jeho slitiny	24
5.5 Titan a jeho slitiny.....	24
6. Vybrané materiály používané v HAO	27
6.1 Hliník 2024.....	27
6.2 Ocel 17 – 4 PH.....	30
6.3 Inconel 718.....	32
6.4 HAYNESS 188	35
6.5 Titan Ti 6 – 4 (Ti-6Al-4V)	40
7. Závěr	43
8. Seznam literatury	44
9. Seznam obrázků.....	45
10. Seznam grafů	46
11. Seznam tabulek	47

1. Úvod

Letectví patří bezesporu mezi obory, které jsou mimořádně citlivé na volbu vhodného materiálu. Účinnost a produktivita letadel je závislá na poměru mezi užitečným zatížením a hmotností prázdné konstrukce letadla. Pro letecký průmysl jsou tedy přijatelné jen takové materiály, které při relativně malé hmotnosti poskytují vysokou pevnost a odolnost vůči proměnlivým zatížením. Materiály jsou v provozu vystavené působení vlivu prostředí se značně proměnlivými charakteristikami, a proto by materiály měly být k němu málo citlivé. Vysoká náročnost při výběru konstrukčních materiálů pro letectví si vyžaduje detailní znalosti materiálových charakteristik s malým rozptylem jejich reálných hodnot.

V konstrukcích letadel jsme se nejprve setkávali se dřevem jako základním stavebním materiálem. Prudký rozvoj letectví zejména v poválečném období umožnily kovové materiály, především hliníkové slitiny. Konec minulého století a současnost se vyznačuje nástupem netradičních umělých materiálů (plastů, kompozitů). [1]

V Honeywell Aerospace Olomouc (HAO) se vyrábějí a opravují statické plechové a žárové díly leteckých turbínových motorů z korozi-vzdorných ocelí, speciálních hliníkových, niklových, kobaltových a titanových slitin pro většinu motorů a energetických jednotek společnosti Honeywell. Právě tyto materiály splňují náročné požadavky, které jsou na ně v leteckém průmyslu kladeny. Na obrázku 1 je znázorněno procentuální zastoupení materiálů na moderním dopravním letadle.



Obr. 1: procentuální zastoupení materiálů na letounu, vlevo v draku dopravního letadla, vpravo na proudovém motoru
(Al – hliníkové slitiny, Fe-oceli, Ti-slitiny titanu, Ni-niklové superslitiny
CFRP (Carbon-fiber-reinforced polymer) – kompozitní materiál s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí, Airframe- konstrukce draku, Engine- motor) [3]

2. Cíle práce

Volbu materiálů pro aplikace při výrobě součástí v leteckém průmyslu ovlivňuje především velké množství požadavků, které jsou na tyto materiály kladeny. Obecně lze rozdělit materiály v leteckém průmyslu do dvou skupin. Do první skupiny bychom zařadili materiály používané na draky letadel. Druhou skupinou jsou materiály, používané při výrobě pohonných jednotek, kterými se budeme zabývat. Požadavky kladené na tyto materiály vyplývají z podmínek, ve kterých pracují komponenty vyrobené právě z těchto materiálů. Jsou to hlavně plechové části spalovací komory, žárové díly turbínových motorů. Proto je nezbytné, aby se použité materiály vyznačovaly vysokou žáruvzdorností, žárovevností, odolností vůči korozi, oxidaci a erozi. Zapomenout nesmíme ale také na rozměrovou stálost. Tyto náročné požadavky nejlépe splňují superslitiny kobaltu a niklu, žárovevné slitiny titanu a oceli, částečně i hliníkové slitiny a kompozity.

Hlavním cílem této práce bude zpracování rešerše z domácích i zahraničních zdrojů, na téma materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc. Budou definovány základní charakteristiky materiálů, rozebráno tepelné zpracování, chemické složení a také struktura. Bude vybráno několik konkrétních materiálů, které se v HAO používají při výrobě. Jsou to hliníkové slitiny, oceli, niklové slitiny, kobaltové slitiny a titanové slitiny.

3. Charakteristiky konstrukčních materiálů

Každý materiál používaný ve výrobě konstrukčních prvků se vyznačuje určitými vlastnostmi. Abychom dokázali příslušný materiál efektivně využívat, potřebujeme k takovému rozhodování detailně poznat jeho základní charakteristiky. Číselné hodnoty níže uvedených charakteristik pomáhají kvantifikovat kvalitativní vlastnosti materiálů. [1]

3.1 Fyzikální vlastnosti materiálů

Fyzikální vlastnosti vyjadřují hmotnostní, tepelné, elektrické a magnetické kvality materiálů a jsou popisovány těmito parametry:

- hustota,
- bod tání a tuhnutí,
- délková a objemová roztažnost,
- tepelná vodivost,
- elektrická vodivost,
- permeabilita. [1]

Pro účely této práce je postačující definovat pouze některé z těchto parametrů.

Délková a objemová roztažnost

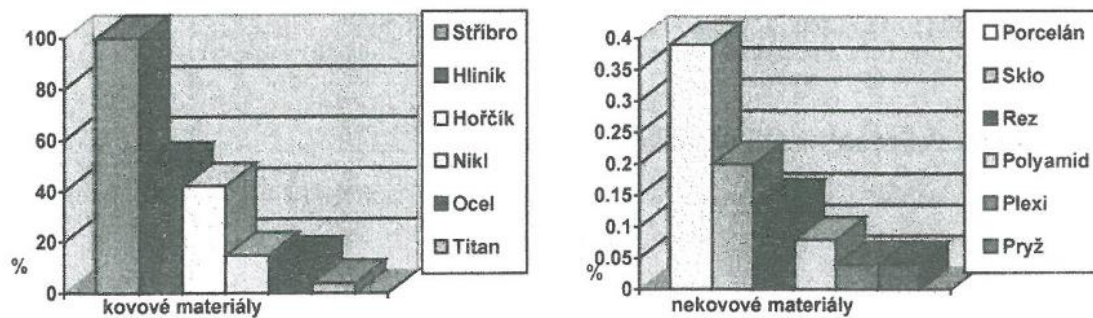
Je dána zvětšením délky materiálu nebo zvětšením jeho objemu při zvýšení teploty materiálu. Je to relativní hodnota, která se udává vzhledem k počáteční délce nebo objemu. Některé materiály (spékané materiály, plasty) vykazují naopak smršťivost, tedy s rostoucí teplotou se jejich rozměry zmenšují. [1]

Z této definice lze vyvodit, že materiály s velkou hodnotou délkové a objemové roztažnosti nejsou příliš vhodné pro tepelně namáhané části.

Tepelná vodivost

Je množství tepla, které při ustáleném stavu projde za jednotku času mezi dvěma protilehlými stěnami krychle o délce hrany 1m, když rozdíl teplot mezi těmito stěnami je 1 K. [1]

Kovové materiály jsou zpravidla několikanásobně lepší vodiče tepla než materiály nekovové. Nejlepším vodičem je stříbro a proto se tepelná vodivost jiných materiálů někdy porovnává se stříbrem a vyjadřuje se potom v % vodivosti Ag, jak ukazuje graf 1. [1]



Graf 1: Tepelná vodivost některých materiálů – relativní parametr porovnání se stříbrem. [1]

3.2 Mechanické vlastnosti materiálů

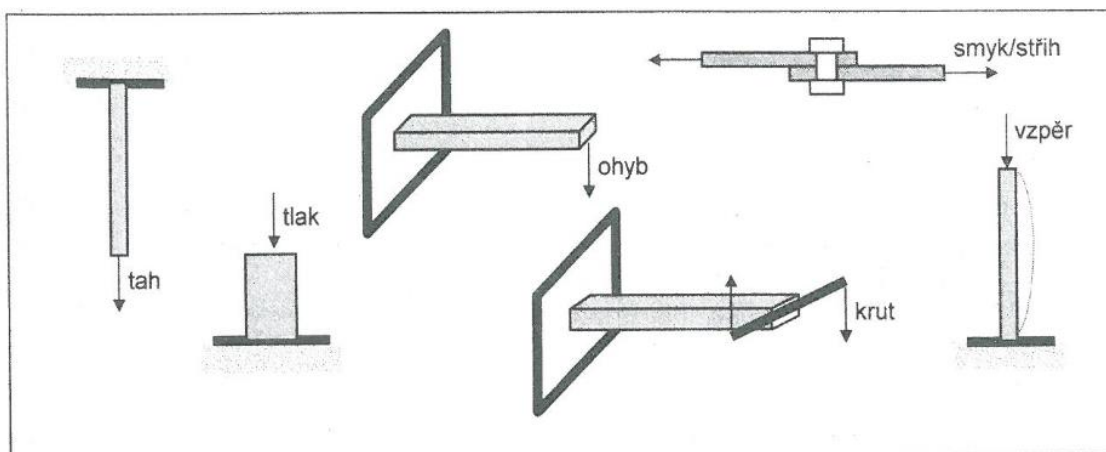
Mechanické vlastnosti vyjadřují kvality materiálů z hlediska působení vnějších zatížení a jeho následných reakcí, nejčastěji pracujeme s těmito parametry:

- pevnost,
- pružnost,
- houževnatost,
- tvárnost.

Pevnost

Je schopnost materiálu odolávat mechanickému zatížení – působení sil a momentů sil. Odolnost vůči působení vnějších sil má u každého materiálu své hranice a při zatížení nad mezi únosnosti dochází k porušení materiálu, k jeho destrukci. Pevnost závisí nejen na jakosti materiálu, ale i na tvaru pevnostního prvku, na jakosti povrchového opracování, na způsobu zatížení a na teplotě.

Jednotlivé případy zatížení jsou provázány určitým namáháním a možné druhy namáhání vysvětluje obrázek 2. [1]



Obr. 2: Základní druhy namáhání při vnějším zatížení. [1]

V rámci pevnosti můžeme zmínit také jako důležitou vlastnost materiálů tvrdost. Je vyjádřena jako schopnost materiálu odolávat vnikání cizího tělesa. [2]

Tvrdot jednotlivých materiálů určujeme zkouškou tvrdosti, které se rozdělují následovně:

- Brinellova zkouška (HBW),
- Rockwellova zkouška (HR),
- Vickersova zkouška (HV),
- Shoreho zkouška (HS).

Pružnost

Je schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná, při odlehčení se rozměry tělesa vrátí na původní hodnoty. Při pružné deformaci neplatí zákon zachování objemu. [1,2]

Houževnatost

Je odolnost materiálu vůči vzniku deformace nebo porušení. Mírou houževnatosti je množství mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo k porušení materiálu. [2]

Tvárnost

Je schopnost materiálu deformovat se před porušením plasticity. Plastická deformace je deformace nevratná, při odlehčení se rozměry tělesa nevrátí na původní hodnoty. Při plastické deformaci platí zákon zachování objemu. [2]

3.3 Chemické vlastnosti materiálů

Chemické vlastnosti jsou určené chemickým složením materiálu a základní chemickou strukturou materiálu. Nás nejvíce zajímají tyto parametry:

- odolnost proti korozi,
- žáruvzdornost,
- žáropevnost.

Koroze

Je znehodnocení materiálů (zejména kovových, ale i plastových i dalších) způsobné chemickým nebo fyzikálně – chemickým působením okolního prostředí. Letadlové konstrukce jsou provozně zatěžovány vždy v intenzivním styku s okolním prostředím, a proto ochrana proti účinkům koroze je velmi významná. [1]

Žáruvzdornost

Je schopnost materiálu dlouhodobě odolávat působení žáru (teplot nad 600°C). Tato vlastnost se může také popisovat jako odolnost vůči opalu. Nejčastěji jsou to slitiny železa s chromem, křemíkem a hliníkem. [1]

Žáropevnost

Materiály s touto vlastností jsou kovové slitiny, které se vyznačují dlouhodobou pevností i za vysokých teplot. Neztrácejí tedy své pevnostní charakteristiky při vysokých teplotách. Není však pravidlem, že tyto materiály jsou také žáruvzdorné. [1]

3.4 Technologické vlastnosti materiálů

Technologické vlastnosti souvisejí se zpracováním materiálu a vyjadřují jeho kvality pro výrobu, k čemuž používáme zpravidla tyto parametry:

- tvářitelnost,
- svařitelnost,
- slévatelnost,
- obrobitelnost.

Tvářitelnost

Je význačná vlastnost kovů a slitin projevující se schopností trvalé deformace bez porušení celistvosti. Tvárný materiál si zachovává tvar daný mu působením vnějších sil při mechanickém opracování, a to i po zániku těchto sil. Toto se využívá při tváření za studena i za tepla (válcování, kování, lisování, tažení atd.). Tvářet lze tahem, tlakem, ohybem, kroucením i kombinovaným namáháním. Změny, které přitom v materiálu probíhají, jsou poznamenány tím, zda tváření probíhá za tepla nebo za studena. S teplotou se mění síla potřebná k dosažení žádoucí deformace, ale i stupeň deformace, který materiál vydrží bez porušení. [1]

Svařitelnost

Je charakteristika materiálu, která určuje za daných technických podmínek svařování technologickou vhodnost materiálu pro spoje předepsané jakosti. Podle technických norem se rozlišuje svařitelnost *zaručená*, *zaručená podmíněná*, *dobrá a obtížná*. Závisí především na materiálových vlastnostech základního a přídavného materiálu (chemické složení, technologie výroby materiálu) a na reálných podmínkách technologie svařování, ale i na konstrukčním řešení a použití svařovaných spojů. Tavením nebo ohřevem materiálů mohou nastat změny mechanických vlastností materiálů. [1]

Slévatelnost

Slévatelnost kovů předurčuje jejich schopnosti vytvářet dobré odlitky. Závisí na tavitelnosti a schopnosti vytvářet hutný odlitek. V roztaveném stavu proto musí mít kov dobrou tekutost, tj. schopnost dokonale a rychle vyplňovat celou formu, přičemž nesmí tvořit bubliny a musí se jen málo smršťovat. Na slévatelnost má vliv tepelná vodivost materiálu, jeho roztažnost, teplota tání a tuhnutí, viskozita, průběh tuhnutí, ale i technologické postupy při odlévání a vlastnosti formy, do které je kov odléván. [1]

Obrobitelnost

Je způsobilost materiálu pro technologické procesy, kterými se ve strojírenské výrobě vytváří požadovaný geometrický tvar obrobku v předepsaných rozměrech a požadované jakosti obrobených ploch. Především jde o chování materiálu při jeho obrábění reznými nástroji (soustružení, frézování, hoblování, vrtání apod.) Závisí zejména na tvrdosti a houževnatosti materiálu, ale i na snadnosti oddělování třísky a na rezném odporu vůči materiálu nástroje. [1]

4. Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení kovu.

Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. V některých případech dochází při tepelném zpracování k dalším pozitivním efektům.

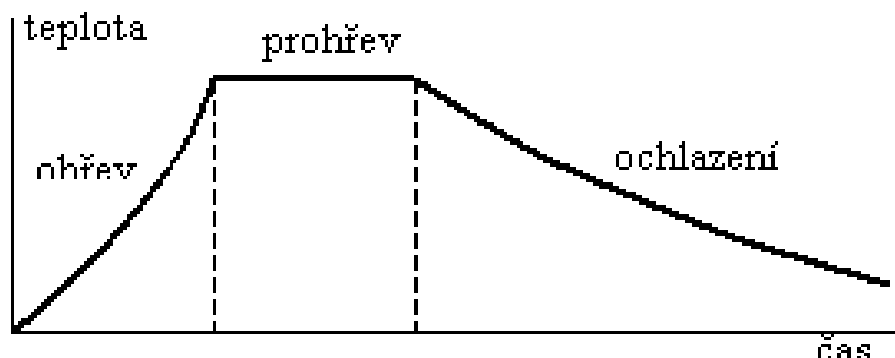
Průběh tepelného zpracování je u všech způsobů a u všech kovových materiálů v podstatě stejný. Skládá se z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě (prohřátí, prohřev) a následném ochlazení, přičemž se tento postup může i vícekrát opakovat.

Konkrétní druh tepelného zpracování je charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu, konečnou výškou teploty ohřevu, dobou setrvání na dané teplotě a rychlostí ochlazování, případně podmínkami při opakování základního postupu.

Vhodná rychlost ohřevu a průběh ohřívání závisejí na účelu tepelného zpracování. U některých postupů je nutný pozvolný ohřev, při němž rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou vnitřku ohřívajícího materiálu není velký, aby v důsledku teplotních dilatací v materiálu nedocházelo ke vzniku pnutí a porušení jeho pevnosti. V těchto případech se ohřev provádí v pecích s regulovanou teplotou, někdy postupně v několika pecích s rozdílnou teplotou. Jiné postupy naopak vyžadují velmi rychlý ohřev povrchu kovu. Příkladem je povrchové kalení ocelí a litin, při kterém se materiál ohřívá plamenem.

Volba výšky konečné teploty ohřevu závisí na povaze strukturálních změn, které při tepelném zpracování probíhají. V některých případech zůstává struktura v podstatě stejná jako za normálních teplot, v jiných dochází v materiálu také ke změně struktury.

Doba ohřevu materiálu opět závisí na účelu zpracování a na rozměrech materiálu. Rychlost ochlazování je závislá na cíli tepelného zpracování. V případech, kdy má během chladnutí být zachován rovnovážný stav soustavy, probíhá ochlazování pomalu. Příkladem je chladnutí materiálu v peci s regulovaným poklesem teploty. V jiných případech je naopak cílem zpracování rychlým ochlazením potlačit změny, ke kterým by došlo v rovnovážném stavu a tak vytvořit nové strukturální složky se specifickými vlastnostmi. Ochlazování stejně jako ohřev může probíhat stupňovitě, přičemž materiál postupně prochází několika prostředími. [4]



Obr. 3: Základní princip tepelného zpracování kovů [4]

4.1 Tepelné zpracování oceli

Tepelné zpracování oceli rozdělujeme do tří základních skupin, a to:

Vlastní tepelné zpracování (TZ)

Využívá se řízených změn teploty.

Chemicko-tepelné zpracování (CHTZ)

Využívá se změn chemického složení povrchových vrstev a teploty.

Tepelně-mechanické zpracování (TMZ)

Využívá se změn teploty a důsledků plastické deformace

Vlastní tepelné zpracování (TZ)

Žihání

Je zpravidla označován ten způsob TZ, jehož cílem je dosažení rovnovážného strukturního stavu. Pro žihání je tudíž charakteristická relativně malá ochlazovací rychlost, zpravidla ne vyšší než odpovídá ochlazování na klidném vzduchu.

Nejčastějšími cíli žihání jsou vytvoření homogenní a jemnozrnné struktury o dobré tvárnosti, houževnatosti a často i obrobitelnosti. Vhodným režimem žihání lze potlačit chemickou heterogenitu, odstranit nežádoucí prvky a snížit úroveň vnitřních pnutí.

Některé druhy žihání jsou zařazeny do technologických postupů jako operace přípravné nebo jako tzv. mezižihání (např. k usnadnění obrábění, k obnově plasticity při tváření za studena). Žihání často bývá i konečnou operací tepelného zpracování, která určuje materiálové vlastnosti výrobku či polotovaru.

Pro polymorfní oceli se dělí postupy žihání podle výšky použité teploty na žihání bez překrytalizace a na žihání s překrytalizací. [5]

Kalení

Kalením se označují ty způsoby tepelného zpracování, jejichž cílem je dosažení nerovnovážných stavů ocelí. Podle převažující struktury složky se kalení rozděluje na

martenzitické a bainitické, přičemž většinou je cílem kalení zajistit vznik struktury martenzitické. [5]

Popouštění

Popouštění se skládá z ohřevu na teploty nižší než A_1 , výdrže na teplotě (v technické praxi se většinou používá prodlevy dvě hodiny) a z následujícího ochlazování vhodnou rychlostí. Protože vnitřní pnutí mohou vést k popraskání zakaleného předmětu i po vyjmutí z kalící lázně (zbrzděné lomy), mělo by popouštění následovat ihned po zakalení.

Podle výšky popouštěcí teploty, která má rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a souvisejících změn mechanických vlastností, se rozlišuje popouštění při nízkých a vysokých teplotách. [5]

4.2 Tepelné zpracování hliníku

Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin lze rozdělit do dvou základních skupin:

- *žihání,*
- *vytvrzování.*

U hliníku a jeho slitin se aplikují následující způsoby *žihání*:

Rekrytalizační žihání – je způsob TZ za studena tvářeného kovu, přičemž dochází z původně deformované struktury ke vzniku nové rekrytalizované struktury. Snižuje se pevnost a zvyšují se plastické vlastnosti původně deformovaného materiálu. V praxi se nejběžněji aplikují teploty v rozmezí 250 – 500 °C.

Stabilizační žihání – je tepelné zpracování za účelem stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobku. Tento způsob TZ se užívá většinou v případě, kdy slitina má v provozu pracovat za určité zvýšené teploty, nebo když během provozu dochází k ohřevu, např. třením. Teploty v rozsahu 240 – 350 °C.

Žihání ke snížení pnutí – je TZ pod rekrytalizační teplotu, s výdrží na této teplotě s následujícím řízeným ochlazováním. Teplota se obvykle volí v rozsahu 300 – 400 °C. Řízené ochlazování je nejméně do teploty 200 °C.

Žihání s částečnou rekrytalizací – je TZ za studena tvářených výrobků vedoucí ke vzniku částečně rekrytalizované struktury, kde vedle rekrytalizovaných zrn je určitý podíl tvářené struktury. V praxi se používají teploty stejné jako u rekrytalizačního žihání 250 – 500 °C, ale je nutno volit kratší čas, aby nedošlo k plné rekrytalizaci.

Homogenizace – je tepelné zpracování při vysoké teplotě (blízké solidu) za účelem odstranění nebo snížení chemické heterogenity difuzními procesy.

Vytvrzování – precipitační žihání

Vytvrzování se skládá ze dvou technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že každé dílčí provedení ovlivňuje konečný výsledek.

Jedná se o úkony:

Rozpouštěcí žihání – je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku a následující rychle ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání nasyceného tuhého roztoku α . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.

Stárnutí – je proces, při kterém dochází ke změně substrukturny a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Může se realizovat buď za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí). [6]

4.3 Tepelné zpracování niklu

Technicky čistý nikl se nejčastěji žihá na snížení pnutí 300 °C/1 h nebo rekrytalizačně 525 – 800 °C/1 h. Slitiny niklu jsou tepelně zpracovány homogenizačním žiháním, rekrytalizačním žiháním, žiháním na snížení pnutí a vytvrzováním.

Vytvrzování žárovevných slitin je jejich nejnáročnějším TZ. Optimální kombinace množství, tvaru, velikosti a způsoby vyloučení zpevňující fáze v objemu slitiny je dosahováno TZ sestávajícím z rozpouštěcího ohřevu, ochlazení a následujícího umělého stárnutí. Teplota rozpouštěcího ohřevu musí být dostatečně vysoká pro co nejúplnější rozpouštění fáze γ . V závislosti na chemickém složení slitiny bývá v rozmezí 1 080 – 1 220 °C. Ohřev 2 h až 12 h je prováděn ve vakuových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou, aby se zamezilo ochuzování povrchu součástí legujícími prvky. Ochlazování z teploty rozpouštěcího ohřevu se obvykle provádí na vzduchu. Prudké ochlazení ve vodě vede ke vzniku trhlin zejména ve vysokolegovaných slitinách s nízkou tvárností.

Stárnutí slitin probíhá při ohřevu na teplotu vyšší než je teplota funkce součásti, v krajním případě na teplotu stejnou. Teploty stárnutí jsou 700 – 950 °C. Při stárnutí se z přesyceného tuhého roztoku vylučují precipitáty fáze γ' a karbidy. Některé slitiny niklu jsou podrobovány stupňovitému stárnutí, kdy se dosahuje co nejúplnější vyloučení fáze γ' provázené vyšší žárovevností. [5]

4.4 Tepelné zpracování titanu

Titan je tepelně zpracováván žíháním:

Plechý 530 ± 10 °C/30 min / vzduch,
Tyče a výkovky 680 ± 10 °C/1 h / vzduch.

Slitiny titanu se tepelně zpracovávají žíháním a vytvrzováním. Podle výšky teploty ohřevu a cíle žíhání jsou to:

Žíhání na odstranění pnutí vzniklých po třískovém obrábění, rovnání, svařování apod. Provádí se při $450 - 650$ °C. Pro průběh rekrytalizačních pochodů jsou teploty nízké.

Žíhání rekrytalizační k odstranění deformačního zpevnění slitin tvářených za studena. Obvyklá teplota žíhání je 800 °C.

Pro $\alpha + \beta$ slitiny lze použít také žíhání izotermické, dvojitě nebo stabilizační:

Žíhání izotermické sestává z ohřevu na $800 - 950$ °C, ochlazení součásti v peci do teploty $500 - 650$ °C nebo přenesení do druhé pece vyhřáté na danou teplotu. Následuje výdrž a ochlazení. Slitiny získávají poměrně vysokou pevnost a žárovevnost spolu s dobrou tvárností.

Žíhání dvojitě se od izotermického liší tím, že po výdrži na prvním stupni následuje ochlazení na vzduchu do pokojové teploty. V závislosti na složení slitiny může vzniknout metastabilní fáze β , která se při novém ohřevu rozpadá na směs stabilních fází $\alpha + \beta$ a dochází tak ke zpevnění slitiny. Dvojitě žíhání přináší vyšší pevnost, ale nižší tvárnost.

Žíhání stabilizační je obdobou předchozího způsobu žíhání s tím rozdílem, že před žíháním nebylo prováděno tváření za studena a tedy vyvolání rekrytalizace není hlavním cílem. Stanilizační žíhání se používá k dosažení stability struktury a pro maximální snížení tvrdosti. Slitiny bez hliníku se žíhají při $600 - 700$ °C, s hliníkem při $700 - 900$ °C. Následuje pomalé ochlazení na vzduchu.

Vytvrzování $\alpha + \beta$ slitin titanu sestává z rozpouštěcího ohřevu, kalení a stárnutí. Teplota rozpouštěcího ohřevu je volena v oblasti $\alpha + \beta$ tak, aby kalením bylo zachováno co největší množství metastabilní fáze β . Kalení se provádí do vody. Čas od vyjmutí předmětu z pece do okamžiku zamočení má být co nejkratší, v sekundách. Poté následuje nový ohřev (stárnutí), nejčastěji za teploty $500 - 600$ °C. Pro tenkostěnné součásti lze použít izotermické kalení. [5]

5. Chemické složení a struktura

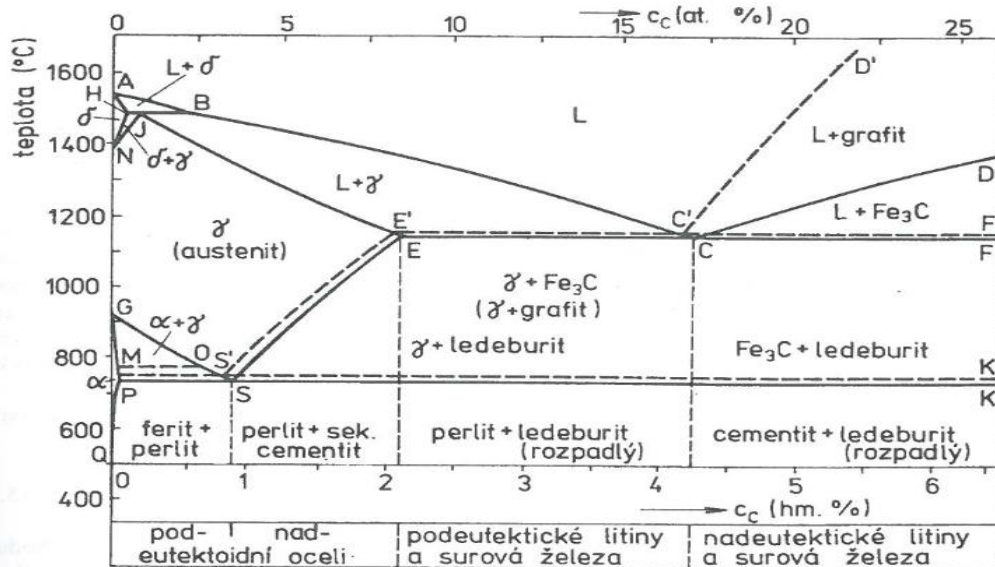
5.1. Železo a jeho slitiny

Železo je jedním z nejvýznamnějších technických kovů. Čisté železo je měkký kov s nízkou pevností. V závislosti na teplotě se železo může vyskytovat ve 2 alotropických modifikacích. Tyto modifikace se mění se zvyšující se teplotou. Obecně se čisté železo v závislosti na teplotě vyskytuje ve 3, popř. 4 formách. Do tzv. Currieho teploty, která je 768 °C, se železo vyskytuje jako Fe_{α} . Fe_{α} má kubickou prostorově středěnou mřížku (BCC) a feromagnetické vlastnosti. Při teplotách nad hranici 768 °C se mění magnetické vlastnosti z feromagnetických na paramagnetické. Do teploty první rekystalizace, která činí 910°C tak hovoříme o Fe_{β} . Při teplotě 910 °C se mění struktura mřížky z BCC na kubickou plošně středěnou (FCC) a vzniká Fe_{γ} . Tato modifikace je stabilní až do teploty druhé rekystalizace 1394 °C, kdy se struktura vrací na BCC. Od teploty 1394 °C až do bodu tání (1538 °C) se železo vyskytuje jako Fe_{δ} . [7], [5], [8]

Na vlastnosti technických slitin železa má významný vliv uhlík. Uhlík zpravidla nejvýznamnějším způsobem ovlivňuje důležité vlastnosti slitin železa. Při predikci vlastností technických slitin železa můžeme proto vycházet s určitou nepřesností z rovnovážného diagramu železa s uhlíkem.

Uhlík s železem tvoří intersticiální tuhé roztoky s omezenou rozpustností uhlíku. Po překročení rozpustnosti uhlíku v tuhém roztoku se uhlík vylučuje jako somostatná fáze. Při nízkých obsazích tvoří uhlík intersticiální sloučeninu Fe_3C . Tato sloučenina není stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Soustava Fe- Fe_3C se označuje jako soustava metastabilní a podle této soustavy tuhnou a chladnou zejména oceli. Jestliže je uhlík vyloučen jako grafit, jedná se o soustavu stabilní, která má svůj význam zejména při posuzování změn při tuhnutí a chladnutí litin a surových želez. [5]

Rovnovázný digram železo uhlík stabilní i metastabilní soustavy je uveden na obr. 4.



Obr. 4: Rovnovázný diagram soustavy železo – uhlík [5]

Oceli se dělí na mnoho podskupin. S ohledem na využití ocelí v leteckém průmyslu se v této práci zaměříme na korozivzdorné (žárovzdorné) a žárovevné oceli.

Korozivzdorné oceli

Základním slitinovým prvkem korozivzdorných ocelí je feritotvorný Cr, který má svoji schopnost pasivace přenášet i na své slitiny s Fe. Aby ocel byla korozivzdorná, musí obsahovat minimálně 13 hm.% Cr při obsahu 0,1 hm.% C. Toto minimální množství Cr se zvyšuje se stoupajícím obsahem C a to až na 18 hm.% Cr při obsahu 1 hm.% C. [9]

Druhým nejdůležitějším prvkem v korozivzdorných ocelí je austenitotvorný Ni, kterého musí být v oceli nejméně 8 hm.%, aby vznikla struktura austenitická.

Většina korozivzdorných ocelí nemá jednotnou strukturu, ale jedna složka vždy převládá (s výjimkou dvoufázových ocelí). Je to ferit, austenit nebo martenzit. Podle výskytu těchto struktur se ocele nejčastěji dělí. Dělit je ale můžeme také podle chemického složení a to na chromové, chromniklové a chrommanganové. [9], [10]

Žárovevné oceli

Má-li součást, pracující za vysokých teplot, přenášet dlouhodobě i větší mechanické namáhání, musí být materiál při dané teplotě nejen žárovzdorný, ale také žárovevný. Uvědomíme-li si podstatu tečení kovů, je zřejmé, že odolnost proti tečení (žárovevnosti) roste:

- s rostoucí teplotou tání kovu,
- s přísadami zpomalujícími difuzi,
- s přísadami zpevňujícími tuhý roztok,
- s jemností a počtem částic tvořících překážky pohybu dislokací,
- s rostoucí velikostí zrna (hrubozrné materiály jsou výhodnější z hlediska tečení, neboť klesá podíl tečení na hranicích zrn).

Kromě přísad nutných k zajištění potřebné žárovevnosti (u teplot nad 400°C) používají se k dosažení žárovevnosti přísady, které působí v některém z uvedených směrů. Nejčastěji jsou to legující prvky, vytvářející jemný stabilní precipitát (karbidy, nitridy, boridy – Mo, W, V, B) a přísady zpevňující tuhý roztok (Cr, Si, Co). [10]

5.2 Hliník a jeho slitiny

Obvykle se slitiny hliníku dělí do dvou základních skupin a to na slitiny pro tváření a slitiny pro odlévání. Společné pro obě skupiny je, že se v obou skupinách objevují stejné přísadové prvky a že některé slitiny, které stojí na hranici mezi oběma skupinami, možno použít jak pro tváření, tak i pro odlévání. Slitiny pro tváření bývají obvykle slitiny, které jsou alespoň za vyšších teplot tvořeny homogenním tuhým roztokem; za nižších teplot se následkem změny rozpustnosti objevuje v jejich struktuře další fáze, většinou sloučeniny vzniklé segregací. [10]

Slitiny pro odlévání bývají většinou slitiny s větším obsahem přísad; jsou heterogenní a v jejich struktuře se objevuje eutektikum. Takové slitiny jsou méně tvárné a se stoupajícím množstvím eutektika postupně svoji tvárnost, zvláště při vyšších

teplotách, ztrácejí. Takové slitiny mají však výborné slévarenské vlastnosti, jsou dobře zabíhavé; jejich zabíhavost se zvětšuje s objemem eutektika. [10]

Základní binární slitiny jsou soustavy Al – Cu, Al – Mg, Al – Mn, Al – Si, Al – Zn. V těchto soustavách tvoří hliník s příslušnými komponentami substituční tuhý roztok α , který je při dobré tvárnosti a houževnatosti pevnější a tvrdší než čistý hliník. Za výchozí ternární slitiny hliníku lze považovat soustavy Al – Cu – Mg, Al – Cu – Si, Al – Cu – Ni, Al – Cu – Zn, Al – Mg – Si, Al – Mg – Mn, Al – Zn – Mg a další. Komplexní slitiny jsou většinou odvozeny ze základních binárních a ternárních slitin hliníku. V základní hmotě tvárného a houževnatého tuhého roztoku jsou uloženy další fáze, které u většiny soustav jsou tvořeny tuhými a křehkými chemickými sloučeninami hliníku s přísadovými prvky a často vzájemnými sloučeninami přísadových prvků. Proto se struktury jednotlivých slitin vzájemně od sebe liší. Komplikací jsou různé nerovnovážné fáze, tvořící se při vytvrzování v průběhu stárnutí, které však při metalografickém rozboru nejsou obvykle zjistitelné. [10]

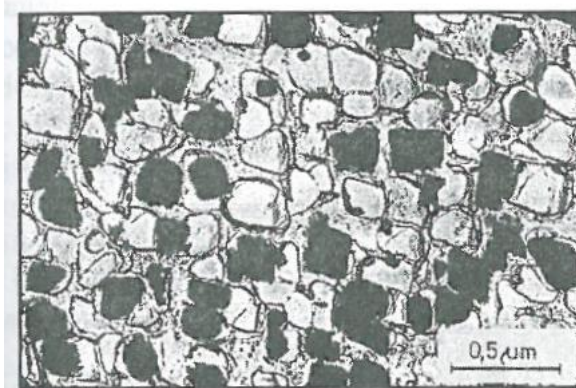
5.3. Nikl a jeho slitiny

Slitiny žárovzdorné mají bázi Ni – Cr, nebo Ni – Cr – Fe. Nikl s chromem tvoří soustavu s úplnou rozpustností v tuhém stavu. Chrom je základním přísadovým prvkem, podmiňujícím udržení žárupevnosti. Jeho obsah bývá od 15 do 30 hmot. %. Obsah železa v úsporné ternární bázi bývá až 20 hmot. %. Struktura žárovzdorných slitin, někdy nazývaných nichromy, je tvořena tuhým roztokem s FCC mřížkou, který je zpevněn pouze substitučně. Proto nemůže za vyšších teplot přenášet mechanická zatížení bez nebezpečí značné rychlosti tečení slitiny. Obsah uhlíku a příměsových prvků, které by mohly tvořit nežádoucí fáze, je minimální. [5]

Slitiny žárovevné mají jako bázi opět tuhý roztok Ni – Cr. Přísadovými prvky je zde také hliník a titan, tvořící hlavní vytvrzující fázi, a prvky karbidotvorné, substitučně zpevňující niklovou matici a vytvářející vlastní karbidy. Při rozpouštěcím ohřevu žárovevné slitiny přísadové prvky přecházejí ze svých sloučenin do tuhého roztoku. Ochlazením vzniká metastabilní tuhý roztok, při jehož následujícím stárnutí se vylučují vysoce disperzní precipitáty intermetalických sloučenin. Titan tvoří sloučeninu Ni_3Ti , hliník sloučeninu Ni_3Al . V případě, že jsou ve slitině oba prvky, vzniká fáze $Ni_3(Ti, Al)$, kterou lze považovat za tuhý roztok titanu ve sloučenině Ni_3Al . Označuje se symbolem γ' (obr. 5). [5]

Vysoká žárovevnost slitin niklu je podmíněna přítomností velmi jemných precipitátů fáze γ' rovnoměrně rozdělených v celém objemu slitiny. S objemovým procentem roste žárovevnost slitin. Současně se však tvárnost natolik zhoršuje, že slitiny bohatě legované Ti a Al, mající charakter již kovokeramického materiálu, nelze zpracovat jinak než přesným litím. [5]

K žárovevnosti přispívá i disperze karbidů. Vhodným tepelným zpracováním lze dosáhnout vytvoření karbidických fází typu $M_{23}C_6$, M_6C podél hranic zrn, kde jsou překážkou proti pokluzům. Kovovou složkou M v karbidech je nejčastěji chrom, případně také molybden. Obsah prvků v žárovevných slitinách niklu bývá v těchto rozmězech [hmot. %]: 12,5 až 30 Cr; max 20 Co; max 50 Fe, max 10 Mo; 2,4 až 5 Ti; max 6,1 Al; 0,035 až 0,18 C. Některé slitiny obsahují též 0,03 Ce; max 5,25 Nb; max 12,5 W; 0,03 až 1 Zr; 0,002 až 0,033 B. [5]



Obr. 5: Precipitáty zpevňující fáze γ' v niklové žárovevné slitině, extrakční replika [5]

5.4 Cobalt a jeho slitiny

Žáropevné slitiny kobaltu představují asi 50% objemu vyráběných kobaltových slitin. Jsou přednostně určeny pro teplotně a napětově nejvíce exponované součásti, jako jsou lopatky plynových turbín. Jejich bázi tvoří žárovzdorný tuhý roztok Co – Cr – Mo – Ni. Na rozdíl od slitiny niklu není v kobaltových slitinách dostatečně účinný mechanismus zpevnění precipitačním vytvrzováním sloučeninami s hliníkem a titanem. Tyto silně oxidující prvky se jako přísada v žárovevných kobaltových slitinách tedy nepoužívají, což znamená, že příprava kobaltových žárovevných slitin a jejich odlévání nevyžaduje nákladnou vakuovou technologii, jako je tomu u obdobných slitin niklu. Jedinnými mechanismy zpevnění v kobaltových žárovevných slitinách jsou substituční zpevnění matrice rozpuštěnými prvky s disperzní zpevnění nevelkým obsahem poměrně hrubých částic karbidů (proto je obsah uhlíku v kobaltových slitinách vyšší než ve slitinách niklu). Za středních teplot kobaltové slitiny mají proto nižší charakteristiky žárovevnosti než slitiny niklu účinněji precipitačně zpevněné velmi jemnými částicemi intermetaloidů. Za teplot nad 800°C je žárovevnost slitin obou skupin srovnatelná, protože ve slitinách niklu probíhá odpevňování v důsledku zpětného rozpouštění vytvrzující fáze γ' . [5]

5.5 Titan a jeho slitiny

Titan má dvě alotropické modifikace:

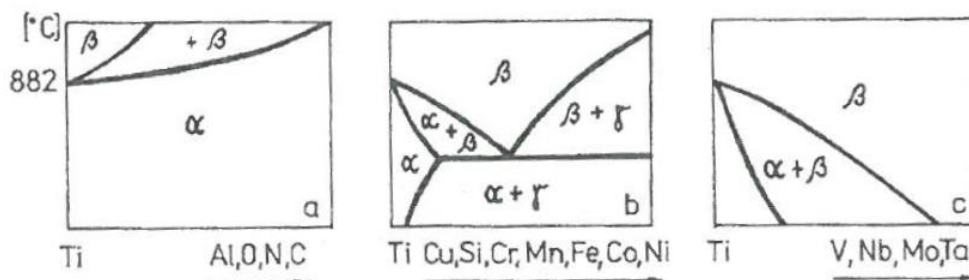
- Ti α s mřížkou HCP, stabilní do 882,5 °C
- Ti β s mřížkou BCC, stabilní od 882,5 do teploty tání 1 668 ± 4°C.

Přísadové prvky se v obou modifikacích titanu rozpouštějí úplně nebo částečně a tvoří roztoky α a β , které mají zachování mřížku dané modifikace titanu. Některé prvky se navíc s titanem slučují a tvoří intermetalické sloučeniny. Podobně jako v ocelích mohou ve slitinách titanu existovat při nerovnovázných podmínkách fázových přeměn metastabilní fáze martenzitického typu. [5]

Rovnovážné stavy soustav Ti-přísadový prvek jsou vyjádřeny rovnovážnými diagramy. Pro popis fázových přeměn v tuhém stavu, které vedou ke stavům

rovnovážným, se obvykle používají spodní části těchto diagramů, které slouží ke klasifikaci charakteru působení přísadových prvků:

- α stabilizátory (Al, O, N, C) teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ zvyšují, tedy stabilizují tuhý roztok α . Nečistoty O, N a C jsou nečistoty, jejichž obsah je třeba udržet minimální, protože i jejich velmi malá množství značně zvyšují tvrdost a křehkost slitin. Praktický význam jako α stabilizátor má proto pouze hliník. Je použit téměř ve všech průmyslově vyráběných slitinách titanu;
- β stabilizátory teplotu přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ snižují, tj. stabilizují tuhý roztok β . Při dostatečně vysokém obsahu těchto prvků tuhý roztok β zůstává zachován až do normální teploty jako fáze stabilní (V, Nb, Mo, Ta) nebo se tuhý roztok β při nízké teplotě rozpadá eutektoidní přeměnou (Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni);
- neutrální prvky (Sn, Zr) na teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ nemají vliv. [5]



Obr. 6: Vliv přísadových a příměsových prvků na teplotu polymorfni přeměny ve slitinách titanu. [5]

Podle konečné struktury, vytvořené při pomalém ochlazování z teploty žhání, se slitiny titanu dělí na:

- slitiny α ,
- slitiny pseudo α (obsahují max 6 hm. % fáze β),
- slitiny $\alpha + \beta$,
- slitiny pseudo β (obsahují malá množství fáze α),
- slitiny β .

Slitiny α

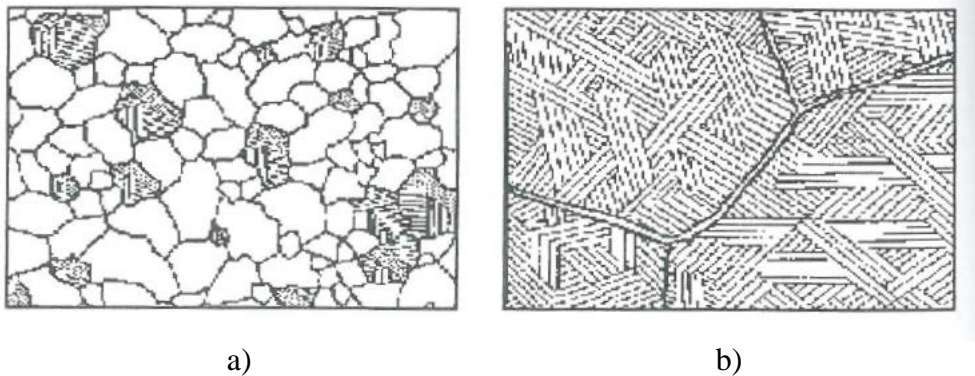
Kromě α – stabilizátoru hliníku obvykle obsahují neutrálně působící cín a zirkon. Jsou to slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Mají dobrou žárovevnost do 300 °C. Optimální vlastnosti mají slitiny s asi 5 hm. % Al a 2 až 3 hm. % Sn. [5]

Slitiny pseudo α

Do základní báze Ti – Al jsou přidány prvky stabilizující a zpevňující fázi β . Dalšího zpevnění se dosahuje neutrálně působícím Zr a Sn. Obsah fáze β bývá 2 až 6 hmot. %. Jsou to slitiny mající pevnost o 10 až 20 % větší než slitiny α a lepší tvařitelnost za pokojové teploty v důsledku přítomnosti fáze β a větší plasticitou než fáze α . [5]

Slitiny $\alpha + \beta$

Vyznačují se širokou škálou struktur a tedy i vlastností závislých na podmínkách tvaření a tepelného zpracování. Mohou být tvořeny buď rovnoosými zrny nebo lamelami obou tuhých roztoků, případně směsami obou těchto morfologií (obr. 8). Jsou to nejčastěji používané slitiny (slitina Ti-6Al-4V s pevností v tahu až 1 125 MPa je nejvíce používanou slitinou titanu). Mají lepší tvařitelnost v žíhaném stavu než slitiny α a pseudo α , lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit (do průměru max 25 mm). Vytvrzené slitiny však mají sníženou lomovou houževnatost. Svařitelnost a odolnost proti tečení je horší než u slitin α a pseudo α . Slitiny $\alpha + \beta$ se používají pro silově zatížené součásti jako jsou lopatky turbín a kompresorů, spojovací elementy, součásti leteckých draků, části podvozku letadel, jízdni kola, sportovní náradí aj. [5]



*Obr. 7: Hlavní morfologické typy struktur slitin $\alpha + \beta$ v žíhaném stavu
a) Rovnoosá zrna tuhých roztoků $\alpha + \beta$
b) Lamely tuhých roztoků $\alpha + \beta$ [5]*

Slitiny β a pseudo β

Jsou to materiály stále ve vývoji. Jejich hlavní předností je vysoká odolnost proti korozi a velmi dobrá tvařitelnost za pokojové teploty, daná BCC mřížkou fáze β . Nedostatkem je větší hmotnost než u jiných slitin titanu a značná cena, protože přísadovými prvky ve velké koncentraci jsou kovy s velkou měrnou hmotností a vysokou teplotou tání, jejich výroba v požadované čistotě je velmi obtížná a nákladná. Pevnost v tahu těchto slitin dosahuje po vytvrzení až 1 400 MPa. [5]

6. Vybrané materiály používané v HAO

V této kapitole jsou uvedeny konkrétní materiály, které se v HAO používají. Cílem je zhodnocení jejich základních vlastností a také to, jaký vliv mají jejich vlastnosti na výrobní procesy.

6.1 Hliník 2024

Hliník 2024 je slitina, která obsahuje až 95 % hliníku a je možné ji tepelně zpracovat. Pro zlepšení mechanické pevnosti se používá precipitační vytvrzování. Jako všechny normalizované slitiny hliníku, je i tato slitina dodávána v určitém standardizovaném stavu. Stav, ve kterém se slitina dodává se označuje následujícím způsobem:

2024 – T0 => Slitina je žhánána. Při tomto zpracování má slitina nejnižší pevnost a nejvyšší tažnost. [11]

2024 – T351 => Slitina je tepelně zpracována rozpouštěcím žhánáním. Vnitřní pnutí je odstraněno protahováním a následně se slitina ponechá přirozeně vystárnout. Toto zpracování se používá na výrobky, jako jsou plechy, desky a tyče. [11]

Se zvyšující se teplotou Hliník 2024 ztrácí pevnost a získává lepší tažnost. Tyto změny mechanických vlastností nejsou přímo úměrné teplotě. Výše teploty, při které začne docházet ke změnám mechanických vlastností není dobře prostudována. Nicméně lze říct, že hliníkové slitiny mění své mechanické vlastnosti při teplotě přibližně 100°C, což je teplota, při které vzniká i creep.

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny přibližné hodnoty meze pevnosti v tahu při zvýšené teplotě. [11]

	25 °C	100 °C	200 °C	300 °C
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	200	190	80	
T3	490	460	200	50
T351	460	430	190	47
T3510	480	450	200	49
T3511	480	450	200	49
T36	490	460	200	50
T361	490	460	200	50
T4	490	460	200	50

Tab. 1: Přibližné hodnoty meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty [11]

Teplota žhánání Hliníku 2024 je 415 °C. Prodleva na této teplotě je v rozmezí 2 až 3 hodin.

Chemické složení slitiny Hliník 2024 je uvedeno v následující tabulce:

Hliník 2024	
Prvek	%
Hliník	90.70 – 94.70
Chróm	0.10 max.
Měď	3.80 – 4.90
Železo	0.50 max.
Hořčík	1.20 – 1.80
Mangan	0.30 – 0.90
Křemík	0.50 max.
Titan	0.15 max.
Zinek	0.25 max.

Tab. 2: Chemické složení slitiny Hliník 2024

Velkým problémem všech hliníkových slitin, které pracují za zvýšené teploty je jejich tepelná roztažnost. Na povrchu hliníkových slitin se vytváří tenká vrstva oxidu hlinitého, který zajišťuje chemickou odolnost slitiny. Oxid hlinitý má ale odlišnou tepelnou roztažnost než samotná slitina (zhruba třikrát tolik). To znamená, že v průběhu velké změny teploty, dochází ke vzniku napětí ve vrstvě oxidu. [11]

Tváření

Hliník 2024 je slitina určená primárně ke tváření a je tepelně zpracovatelná. Díky tomu, že není nutné do slitiny přidávat žádné zpevňující prvky, může být tato slitina aplikována na tvary jakékoliv složitosti. Díky těmto vlastnostem je slitina 2024 vhodná pro všechny druhy tvářecích metod, jako jsou například kování, tažení, válcování a další. Nejčastější metodou výroby polotovárů z této slitiny je tažení. Lze vyrábět dlouhé tyče, které mohou být následně obráběny nebo jinak mechanicky zpracovány. [11]

Svařování

Slitina 2024 je při svařování náchylná k praskání, a proto ji nelze svařovat s použitím obvyklých metod. Nicméně je jí možné svařovat třením. U všech hliníkových slitin lze použít tuto technologii, protože při ní vzniká poměrně menší množství tepla než u ostatních metod. Z tohoto důvodu také nedochází k závažným změnám mechanických vlastností. [11]

Spojování

Hliníkové slitiny lze spojovat celou řadou mechanických prostředků (šrouby, kolíky, nýty, hřebíky, atd.). Hlavním problémem, který může nastat při spojování hliníkových dílů těmito metodami je galvanická koroze. Otvory pro šrouby lze vrtat před jakoukoliv povrchovou dokončovací operací. [11]

Povrchová úprava

Anodická oxidace je nejrozšířenější metoda pro úpravu povrchu pro většinu hliníkových slitin, ale nelze ji použít pro většinu jiných kovů. Základní operace anodické oxidace je chemické zesílení vrstvy oxidu. To znamená nejen zvýšení odolnosti proti otěru (a zvýšení odolnosti vůči korozi, která je s tím spojená), ale také snížení tepelné a elektrické vodivosti povrchu slitiny. Anodická oxidace se obecně vylučuje s lakováním, ale často se provádí po mechanické nebo chemické úpravě povrchu. [11]

Lakování Hliníku 2024 může být prováděno běžným nátěrem tekuté barvy nebo s použitím práškovací metody. Práškové lakování poskytuje silnější a jednotnější povlak, ale vyžaduje vytvrzení v peci. Z tohoto důvodu nemůže být použito na obzvláště velké součásti. [11]

Galvanické pokovení této slitiny je také možné, ale relativně neobvyklé. S touto metodou je totiž spjato nebezpečí vzniku bodové koroze, pokud se na povrchu nachází defekt. Navíc se před pokovením musí odstranit vrstva oxidů, což zvyšuje náklady a složitost procesu. Chromování je nejběžnějším pokovením prováděným na Hliníku 2024, protože má navíc funkci základního nátěru pro některé jiné procesy. [11]

6.2 Ocel 17 – 4 PH

Ocel 17 – 4 PH patří do skupiny martenzitických precipitačně vytvrditelných nerezových ocelí, která poskytuje vynikající kombinaci vlastností. Vysokou pevnost, dobrou odolnost proti korozi, dobré mechanické vlastnosti při teplotách až do 316 °C, dobrou houževnatost samotné slitiny, ale také svařovaných spojů. Její výhodou je také krátkodobé tepelné zpracování při nižších teplotách, které minimalizuje tvarové deformace. [12]

Standardní tepelné zpracování je typu A (rozpoštěcí žíhání při teplotě 1 038 °C, ochlazené na vzduchu). Avšak nerezová ocel 17 – 4 PH může být tepelně zpracována za různých teplot a časů. Díky tomu máme širokou škálu vlastností, kterými může tato ocel disponovat. Bylo vyvinuto osm standardních tepelných zpracování. V následující tabulce jsou uvedeny časy a teploty, které jsou pro tato tepelná zpracování požadována. [12]

Standard Heat Treatments

Condition	Heat To ± 15°F (8.4°C)	Time at Temperature, hours	Type of Cooling
H 900	900°F (482°C)	1	Air
H 925	925°F (496°C)	4	Air
H 1025	1025°F (551°C)	4	Air
H 1075	1075°F (580°C)	4	Air
H 1100	1100°F (593°C)	4	Air
H 1150	1150°F (621°C)	4	Air
H 1150+1150	1150°F (621°C)	4	Air
	1150°F (621°C)	<i>followed by</i> 4	Air
H 1150-M	1400°F (760°C)	2	Air
	1150°F (621°C)	<i>followed by</i> 4	Air

Tab. 3: Standardní tepelná zpracování pro ocel 17 – 4 PH [12]

V následující tabulce je uvedeno chemické složení této oceli.

Chemické složení oceli 17 – 4 PH	
Prvek	[%]
Uhlík	0.07 max.
Mangan	1.00 max.
Fosfor	0.040 max.
Síra	0.030 max.
Křemík	1.00 max
Chróm	15.00 – 17.50
Nikl	3.00 – 5.00
Měď	3.00 – 5.00
Niob + Tantal	0.15 – 0.45
Železo	zbytek

Tab. 4: Chemické složení oceli 17 – 4 PH [12]

Ocel 17 – 4 PH zajišťuje skvělou odolnost vůči korozi. Odolává korozi lépe než některé ze standardních vytvrditelných korozivzdorných ocelí. To bylo potvrzeno ve skutečném provozu v široké škále podmínek (petrochemický, papírenský, mlékarenský a potravinářský průmysl). [12]

Tváření

Vzhledem k tomu, že je tato ocel poměrně tvrdá a pevná, tváření by mělo být omezeno na méně náročné operace. Nicméně, tvaritelnost může být výrazně zlepšená tepelným zracováním před tvářením za studena nebo použitím tvářecích metod za tepla. [12]

Obrábění

Základním kritériem pro určení podmínek pro obrábění je množství uhlíku v oceli. Je-li obsah uhlíku do 0.15 %, jsou řezné rychlosti téměř totožné s obráběním ocelí nízkolegovaných. [12]

Svařování

Skupinu vytvrditelných nerezových ocelí obecně považujeme za dobře svařitelnou. Svařovat můžeme všemi běžnými způsoby (MIG/MAG, odporové svařování). Je vhodné provést přehřev součásti před samotným svařováním a následně součást tepelně zpracovat. [12]

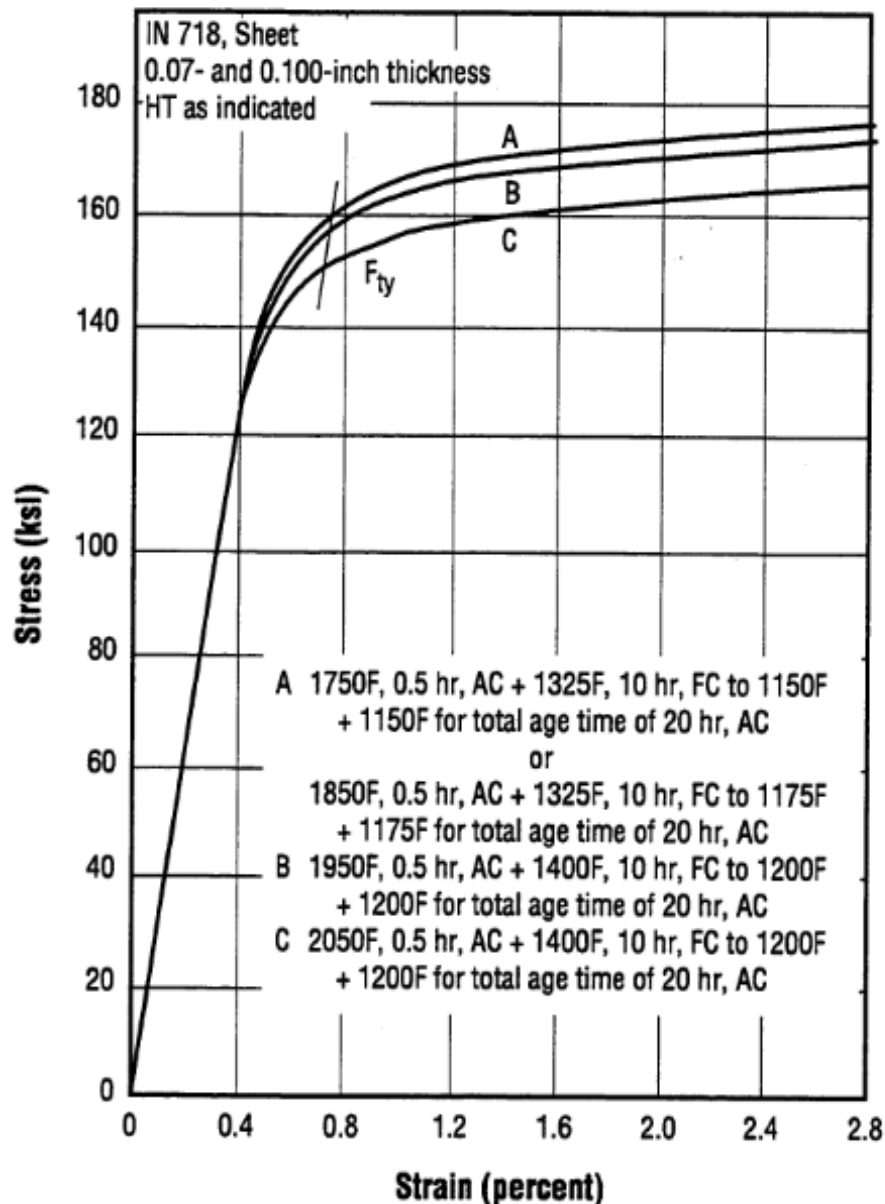
Čištění

Účinky tepelného zpracování způsobují lehké zabarvení na povrchu. To lze snadno odstranit vhodnými postupy, jako jsou mokré tryskání nebo krátkodobým ponořením do 10% kyseliny dusičné a 2% kyseliny fluorovodíkové při teplotě 40–60°C. Pokud moření není vhodné, teplotní zabarvení je možno odstranit za pomoci lehké elektrolytické operace. [12]

6.3 Inconel 718

Inconel 718 je nejpoužívanější superslitina v leteckém průmyslu. Tvoří přibližně jednu třetinu veškeré výroby superslitin. Disponuje vynikající pevností, tažností a houževnatostí v celém rozsahu pracovních teplot $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Patří mezi vytvrditelné materiály. Pevnost je do značné míry ovlivněná precipitací γ' fáze během tepelného zpracování. Hlavním atributem slitiny Inconel 718 je její univerzálnost ve zpracování. Může být tvářena v širokém rozmezí teplot, protahována a tažena pro vytvoření požadované mikrostruktury. Inconel 718 je jedinečná mezi niklovými slitinami, díky skvělé svařitelnosti a dobré odolnosti vůči únavovému lomu. Slitina má vynikající odolnost proti oxidaci. Typickými aplikacemi v letectví jsou kompresory, turbínové disky, lopatky, nosníky a šrouby pro tryskové motory. [13]

V grafu 2 jsou znázorněny křivky napětí – deformace této slitiny po tepelném zpracování.



Graf 2: Křivky napětí – deformace pro Inconel 718 po tepelném zpracování [13]

Chemické složení slitiny Inconel 718 je uvedeno v následující tabulce:

Slitina AMS Specifikace	Inconel 718					
	5596G, 5597D, 5664D, 5589C, 5590C, 5832D		5662J, 5663F		5383D	
Prvek	[%]					
	min	max	min	max	min	max
Nikl	50.00	55.00	50.00	55.00	50.00	55.00
Chrom	17.00	21.00	17.00	21.00	17.00	21.00
Niob + Tantal	4.75	5.50	4.75	5.50	4.75	5.50
Molybden	2.80	3.30	2.80	3.30	2.80	3.30
Titan	0.65	1.15	0.65	1.15	0.65	1.15
Aluminium	0.20	0.80	0.20	0.80	0.40	0.80
Kobalt	-	1.00	-	1.00	-	1.00
Uhlík	-	0.08	-	0.08	-	0.08
Mangan	-	0.35	-	0.35	-	0.35
Křemík	-	0.35	-	0.35	-	0.35
Fosfor	-	0.015	-	0.015	-	0.015
Síra	-	0.015	-	0.015	-	0.015
Bor	-	0.006	-	0.006	-	0.006
Měď	-	0.30	-	0.30	-	0.30
Olovo	-	-	-	0.0005	-	-
Bismut	-	-	-	0.00003	-	-
Selen	-	-	-	0.0003	-	-
Železo	zbytek		zbytek		zbytek	

Tab. 5: Chemické složení slitiny Inconel 718 [13]

Tváření

Vzhledem ke své dobré pevnosti při zvýšených teplotách má Inconel 718 relativně vysokou odolnost vůči tváření za tepla. Doporučený rozsah teplot při tváření za tepla je od 890 do 1 120 °C. Ohřev nad teplotu 1120 °C je nežádoucí z důvodu nebezpečí vzniku hrubnutí zrn. Tvářecí teplota má vliv na vrubovou citlivost při creepových podmínkách. Aby se snížila tato citlivost, materiál by se měl zpracovávat rovnoměrně s postupně se snižující teplotou. Pokud se zpracovávaná součást ochladí pod teplotu 890 °C mezi tvářecími procesy, je třeba ji znova ohřát. Rozsah teplot při tomto ohřevu je 890 °C až 955 °C.

Tepelně zpracována slitina Inconel 718 může být ochlazována standardními postupy, které se používají také pro oceli a nerezové oceli. Slitina musí být zbavená nečistot a mastnoty, při vložení do ohřívací pece, aby se zabránilo degradaci povrchu. Atmosféra pece by měla mít mírně redukcující účinky s velmi nízkým obsahem síry. [13]

Obrábění

Ve srovnání s nerezovými oceli, je obrobiteľnosť niklovej slitiny Inconel 718 nižšia. Ničmenež pri správnom výbere nástrojových materiálov, rýchlostí posuvů a chladících kapalin, je možné túto slitnu obráběť buď v žíhaném alebo vytvrzeném stavu. Obrábění materiálu v žíhaném stavu zaručuje delší životnosť nástroje, avšak pri obrábění vytvrzené slitiny se tvoří lepší tříška a provádějí se lépe dokončovací operace. [13]

Svařování

Inconel 718 má dobrou svařitelnost, zejména ve spojení s metódou WIG (svařování wolframovou elektrodou). Dále je vhodné svařování plazmou a elektronovým paprskem. Jiné procesy, jako jsou například svařování pod tavidlem nebo MIG/MAG (svařování pomocí inertního nebo aktivního plynu) mohou být také použitelné ve zvláštních případech. Svařování se provádí zpravidla na žíhaném materiálu a je vhodné tepelné zpracování po svařování k dosažení požadovaných vlastností. Vytvrzenou slitinu je také možno svařovat, ale svary jsou poměrně měkké a slabé, pokud se tepelně nepracují. Předehřátí není nutné, ale v případě, že se základní materiál ochladí pod 0 °C, oblast, která má být svařená se zahřeje na 15 až 25 °C, aby nedocházelo ke kondenzaci vlhkosti, což může způsobit poréznost ve svaru.

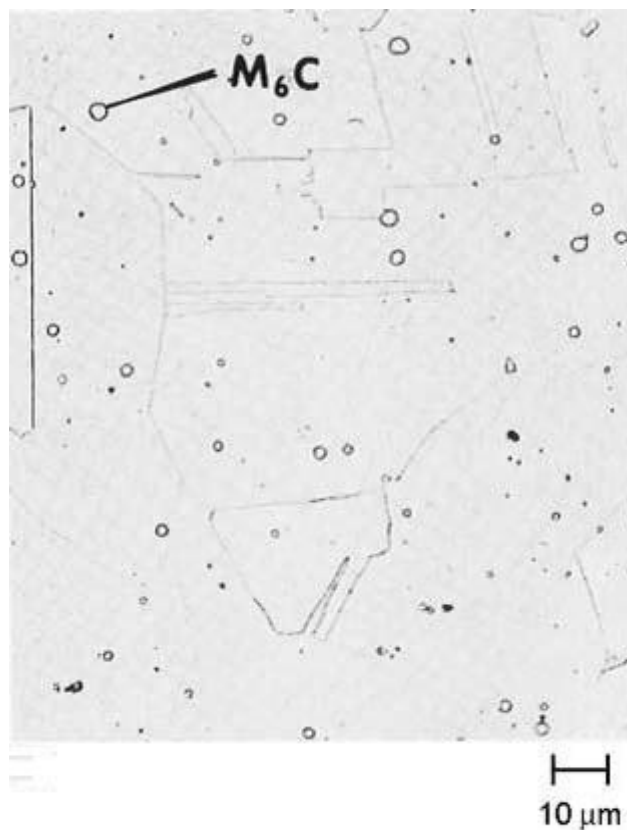
Tyto dobré svařovací vlastnosti jsou spojeny s pomalou kinetikou precipitace primární vytvrzovací fáze. Toto pomalé vytvrzování má za následek, že tepelně ovlivněná oblast při svařování má poměrně vysokou tažnost. Díky tomu dochází k relaxaci zbytkového pnutí ve svaru, a tím se zlepšuje odolnost vůči únavovému lomu. [13]

Pájení

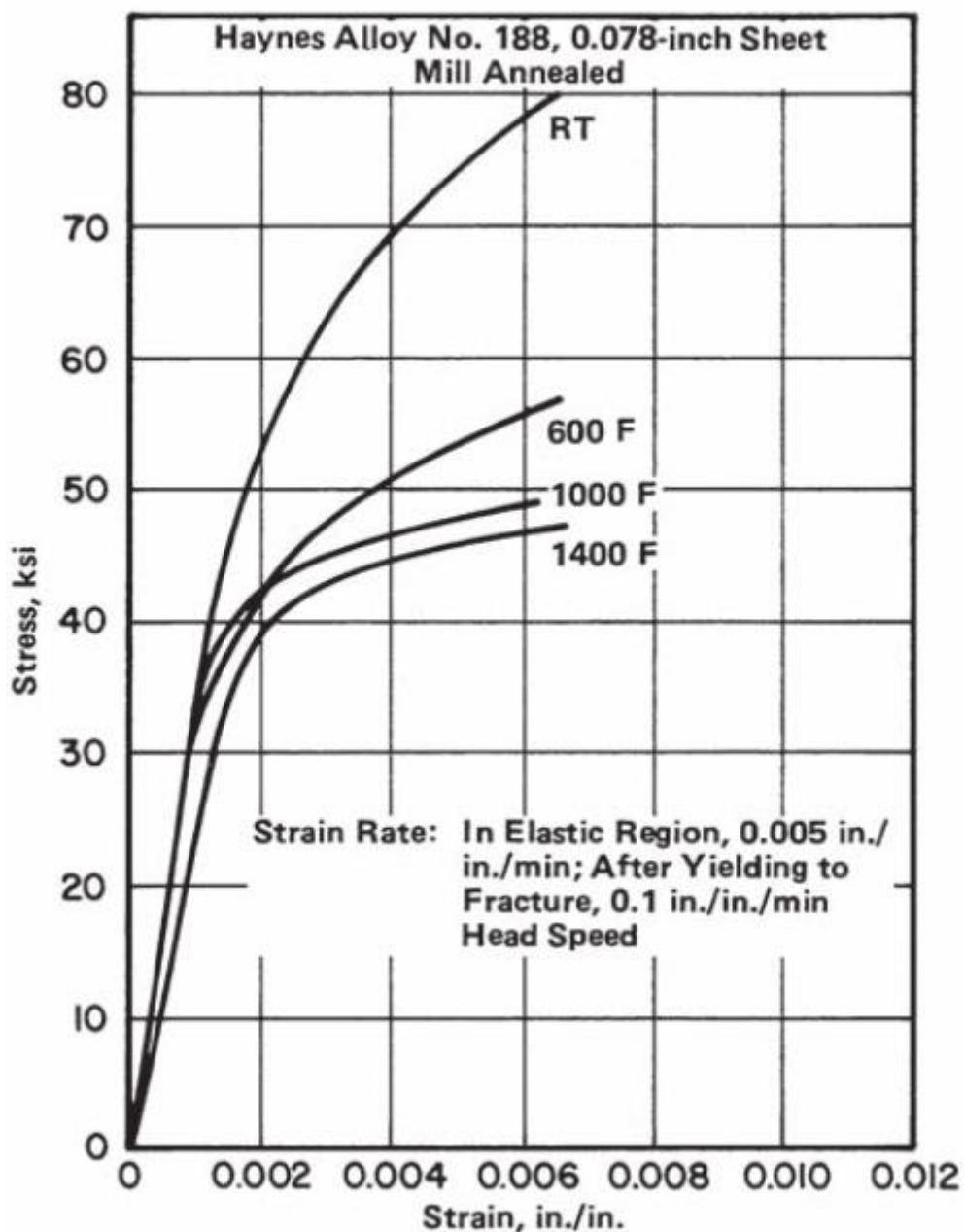
Pájení se u slitiny Inconel 718 nejčastěji provádí za pomoci pájek na bázi stříbra, mědi, a nebo na bázi niklu. Vzhledem k tomu jsou maximální provozní teploty, takto spojovaných součástí, omezeny na 200 až 500 °C pro pájky na bázi stříbra a mědi. Pájky na bázi niklu se ve spojení s Inconel 718 používají nejvíce. Při správném použití a výběru pájky lze vytvořit spoj, který je svou pevností a odolností vůči oxidaci velmi podobný základnímu materiálu při teplotách až do 1 100 °C, ale s relativně nízkou tažností. Povrch materiálu před pájením je možno poniklovat k usnadnění rovnoměrného smáčení mezi pájecím kovem a základním materiálem. Výhodou je, pokud se pájení provádí ve vakuu, při teplotách mezi 950 až 1 135 °C. [13]

6.4 HAYNESS 188

HAYNESS 188 je jedna z nejrozšířenějších kobaltových slitin která se používá v oblasti výroby leteckých motorů. Pevnost HAYNESS 188 slitiny je podobná jako u slitiny L-605 (HAYNESS 25), která byla jejím předchůdcem. Odolnost vůči oxidaci je ale větší. Kryogenní teploty výrazně neovlivňují tvárnost materiálu, ale hodnota pevnosti se významně zvyšuje. Vynikající odolnost proti oxidaci vyplývá z vysokého obsahu chrómu a malého přídavku lanthanu, manganu a křemíku. Slitina má plošně centrovanou kubickou strukturu, v důsledku přidání 22 hm. % niklu. Mikrostruktura slitiny v žíhaném stavu je znázorněna na obr. 9. Tato slitina je legována přidáním 14 hm. % W. Zvýšení pevnosti je dále umocněno precipitací M_6C a $M_{23}C_6$ karbidů při provozní teplotě. [14]



Obr. 8: Mikrostruktura slitiny HAYNESS 188 v žíhaném stavu [14]



Graf 3: Typické křivky napětí – deformace pro plech namáhaný v příčném směru za pokojových a zvýšených teplot [14]

Běžně je tato slitina žháná při teplotě $1\,177\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$ a následně rychle ochlazena. Při žhání pod touto teplotou jsou ve struktuře karbidické precipitáty, které negativně ovlivňují vlastnosti slitiny. [14]

Chemické složení slitiny HAYNESS 188 je uvedeno v následující tabulce.

HAYNESS 188		
Prvek	Obsah ve slitině (hm. %)	
	minimum	maximum
Uhlík	0,05	0,15
Mangan	-	1,25
Křemík	0,20	0,50
Fosfor	-	0,020
Síra	-	0,015
Chróm	20,00	24,00
Nikl	20,00	24,00
Wolfram	13,00	16,00
Hliník	0,20	0,50
Lanthan	0,02	0,12
Bor	-	0,012
Železo	-	3,00
Cobalt	zbytek	

Tab. 6: Chemické složení slitiny HAYNESS 188 [14]

Tváření

Tváření za studena je preferovanou metodou pro ohýbání a hluboké tažení. Tato slitina má vynikající tvárnost, ale má tendenci k vytvrzování při tváření ve větší míře než austenitické nerezové oceli. V důsledku toho může být požadováno více mezistupňů při hlubokém tažení nebo tváření za studena. Žiháním při teplotě 1 177 °C a následným rychlým ochlazením dojde k obnovení původní tažnosti. Nižší žihací teploty způsobují jemnozrnnou strukturu s menší tvárností a vyšší pevností v tahu, než vykazoval původní materiál. Při žihání pod teplotu 1 177 °C bude pravděpodobně také docházet ke vzniku karbidů na hranicích zrn, což má za důsledek horší tvárnost za pokojové teploty a také snížení meze pevnosti při vysokých teplotách. Většina dílů bude vyžadovat žihání na teplotu 1 177 °C po konečném tváření za studena. Je třeba dbát na odstranění všech nečistot na materiálu před žiháním, protože mnoho z těchto nečistot mohou ovlivnit vlastnosti slitiny. Rovněž je žádoucí odstranit vodní kámen z žihané části před další operací tváření, a to buď mořením nebo vhodnými mechanickými prostředky. [14]

Lisování nebo tažení slitiny vyžaduje asi dvakrát tolik mezižihání než je obvyklé u austenitických nerezových ocelí. Při správném mazání můžeme jednoduché operace provádět bez mezižihání. [14]

Obrábění

Obrobitelnost slitiny HAYNESS 188 je stejná jako obrobitelnost L-605 slitiny (25 HAYNESS slitina). Efektivní obrábění vyžaduje použití správného nástroje a rychlost posuvu. Vzhledem k tomu, že kobaltové slitiny mají tendenci se zpevňovat, je třeba se vyhnout přerušovaným řezům, kdykoli je to možné. Obecně platí, že vysokorychlostní nástroje jsou použitelné pro řezání závitů, vystružování, vrtání a frézování. Nástroje ze slinutých karbidů mohou být použity pro určitá hrubování. Brusné operace by měly být prováděny kotouči z oxidu hlinitého. [14]

Svařování

Tuto slitinu lze svařovat pomocí několika běžných typů svařování. Jsou to například svařování za pomoci wolframové elektrody s využitím inertního plynu (WIG), za pomoci kovové elektrody (MIG), a nebo pomoci elektronového paprsku. Svařování plamenem (autogenem) není doporučeno vzhledem k náchylnosti materiálu na tvorbu karbidů kvůli přítomnosti acetylénu. Svařování pod tavidlem se rovněž nedoporučuje, protože proces se vyznačuje vysokou spotřebou tepla při tavení základního kovu a pomalým ochlazením svaru. Tyto faktory mohou zvyšovat odpor ve svaru a podporovat praskání. Obecně je nejvhodnější svařování pomocí wolframové elektrody (WIG). Protože se jedná o slitinu legovanou, mikrostrukturní změny, které probíhají při svařování jsou minimální. Navíc nedochází k žádným alotropickým fázovým transformacím v tepelně ovlivněné oblasti. Při svařování je potřeba se vyhnout kontaminaci povrchu kovovou mědí, která může pocházet z přidržovacích a vodících supportů. Kontaminace mědí může způsobit, že tepelně ovlivněná oblast bude náchylná k praskání. Tomuto jevu lze nejlépe zabránit chromovým pokovením všech přidržovacích součástí. Správné očištění materiálu před svařováním je jednou z nejdůležitějších věcí. Předehřátí není nutné. Teplota materiálu před svařováním by neměla být větší než 90 °C a je třeba se vyhnout nadměrnému přívodu tepla do svaru. Tenké plechy jsou náchylnější na praskání v tepelně ovlivněné oblasti po svařování metodou WIG. Rozsah trhlin souvisí s poměrem mezi tloušťkou plechu a průměru zrna. [14]

Pájení

Tato slitina může být snadno spojena pájením, pokud jsou všechny spojované povrchy zbaveny veškerých nečistot. Čištění může být provedeno leptáním pomocí rozpouštědla, odmašťováním nebo mechanickým tryskáním. Mohou být použity mnohé slitiny pro pájení v závislosti na provozních podmínkách. Nicméně se nedoporučuje používat slitiny z vysokým obsahem mědi nebo stříbra. Pájecí slitiny na bázi niklu nebo kobaltu jsou doporučovány při aplikacích za zvýšené teploty. Pájení by mělo být prováděno v peci s řízenou atmosférou, jako je například argon, vodík nebo vakuum. [14]

Difuzní lepení

Pomocí této metody lze součásti spojovat jen za vhodných podmínek. Je nutné kompletní odstranění povrchových oxidů a všech nečistot. Následné zpracování se provádí ve vakuové peci. Teploty blízké 1 175 °C jsou dostačující k dosažení metalurgické vazby. Pro další kritické aplikace, které vyžadují mimořádnou kvalitu spoje, se doporučuje přidání vhodného materiálu jako mezivrstvy. Pevnost spoje ve

smyku se blíží 75 % tahového napětí. Protože slitina má vynikající stabilitu při vysokých teplotách, dlouhodobé zvýšení teploty tepelného cyklu spojené s procesem difuzního lepení, neovlivňuje vlastnosti základního materiálu. [14]

Čištění

Tato slitina je relativně inertní vůči rozpouštění v kyselině. Roztavené žíravé lázně s následným kyselým mořením se ukázaly jako nejúčinnější z konečných čistících operací. Odstraňování vodního kamene se provádí při 425 °C až 540 °C v roztoku soli na bázi hydroxidu sodného s různými katalyzujícími a oxidačními činidly. Tryskání párou nebo pískem lze také použít pro odstranění vodního kamene za určitých podmínek. Pískovací materiály by měly být takové, které mají spíše schopnost rychlého řezání, než rozmazávání povrchu. Písek nesmí být znova použit zejména v případě, že došlo ke kontaminaci železem. Po otrýskání je vhodné dát součást do kyselé lázně pro odstranění železných nebo jiných nečistot. Pozornost by měla být zvýšena také při pískování tenkých součástí, kvůli nebezpečí vrytí se zrněk písku do povrchu součástí. Pískování může také způsobit vytvrzení povrchu materiálu a může způsobit problémy při tváření. [14]

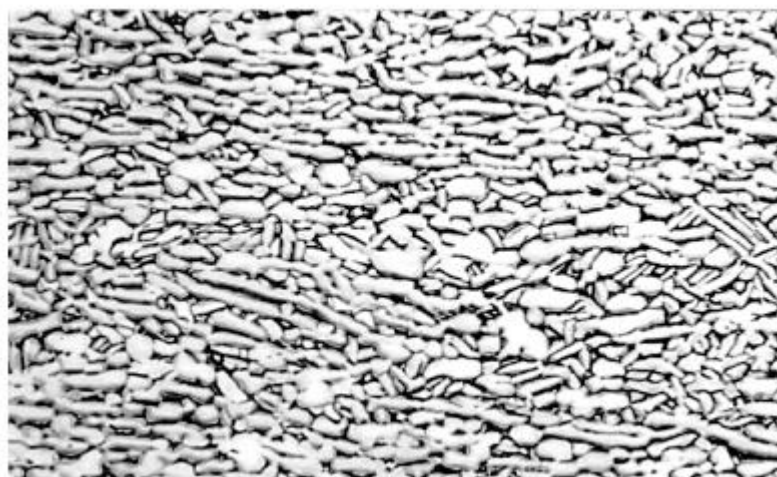
6.5 Titan Ti 6 – 4 (Ti-6Al-4V)

Titanová slitina Ti 6 – 4 patří do skupiny slitin, která obsahuje fázi α i β . Kde je hliník jako stabilizátor fáze α a vanad jako stabilizátor fáze β . Je nejpoužívanější slitinou titanu. Výhodou této slitiny oproti ostatním titanovým slitinám je dobrá tvařitelnost a svařitelnost. Tato slitina se používá hlavně díky její malé hustotě (přibližně polovina hmotnosti ocelí, niklových slitin), a přitom má vynikající mechanické vlastnosti, velmi dobrou odolnost proti korozi (hlavně vůči chloridům, mořské vodě, kyselému a oxidačnímu prostředí), dobré vlastnosti za zvýšené teploty (až 400 °C). Slitina se používá v žíhaném stavu nebo je podrobena stárnutí. Typickými aplikacemi této slitiny jsou: lopatky kompresorů, disky a kroužky pro tryskové motory, tlakové nádoby, skříně raketových motorů, náboje rotoru vrtulníků, spojovací materiál. [15]

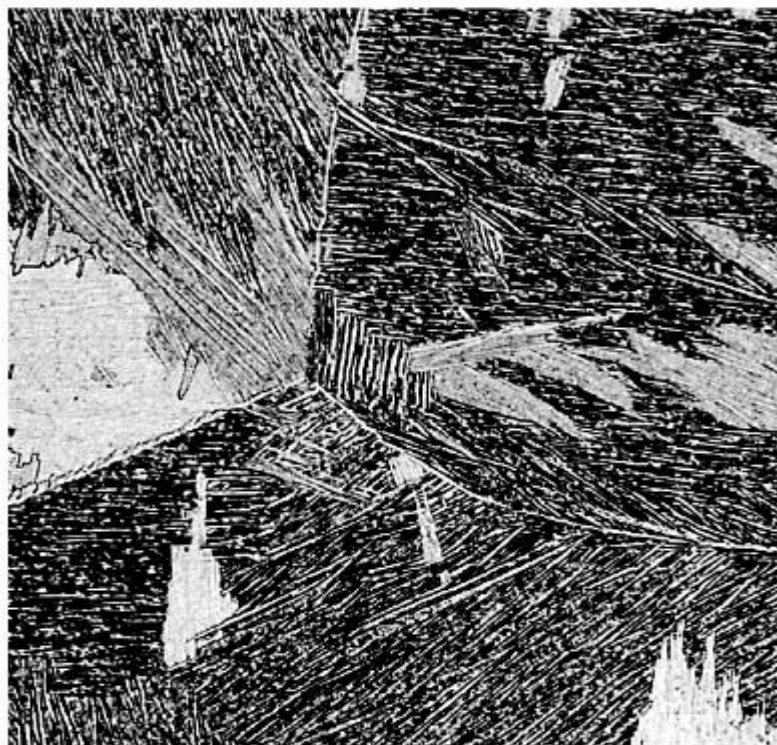
Chemické složení slitiny Ti 6 – 4 je uvedeno v následující tabulce:

Ti 6 – 4	
Prvek	%
Uhlík	0.10 max.
Železo	0.25 max.
Dusík	0.05
Kyslík	0.020 max.
Hliník	5.50 – 6.75
Vanad	3.50 – 4.50
Vodík	0.015 max.

Tab. 7: Chemické složení slitiny Ti 6 – 4 [15]



Obr. 9: Mikrostruktura slitiny Ti 6 – 4 (788 °C/15 min.: ochlazena na vzduchu) žíhaný stav [16]



Obr. 10: Slitina Ti 6 – 4 (1016 °C/20 min.: Ochlazena na vzduchu) struktura β [16]

Tváření

Slitina Ti 6 – 4 se tváří standardními metodami jako je válcování, kování a lisování za zvýšené teploty. Typicky se tváření za tepla provádí v teplotním rozsahu 870 – 980 °C, kdy jsou fáze alfa/beta stabilní. Je třeba dbát, aby nedocházelo k vysoké tvorbě fáze alfa. Pokud se tak stane, je po zpracování třeba tento nadbytek odstranit. Tváření plechů se obvykle provádí při teplotách okolo 650 °C. Slitinu je možno také úspěšně zpracovat pomocí superplastického tváření, při kterém se používá teplota v rozmezí od 850 °C do 900 °C. Mez kluzu Titanu Ti 6 – 4 poměrně rychle klesá se zvyšující se teplotou, takže je snadno tvarovatelný při středních teplotách. Například, zahřejeme slitinu jen na 425 °C, mez kluzu klesne přibližně o 40 %. Tváření za tepla se používá ve velké míře při výrobě mnoha výrobků, včetně spojovacího materiálu letadlových celků. [15]

Přestože je zpracovatelnost za pokojových teplot poněkud omezená, tento materiál může být tvářen také za studena. Nejčastěji se provádí tažení a lisování. Velkým problémem je odpružení, které je charakteristické pro Titan Ti 6 – 4. Proto se součásti často po tváření ohřívají. [15]

Obrábění

Obecně platí, že při obrábění této slitiny se používají nízké řezné rychlosti, pomalé posuvy a velké množství řezné kapaliny. Řezná kapalina by neměla obsahovat chlór, aby nedošlo ke kontaminaci chlórem. Je třeba poznamenat, že titanové třísky jsou vysoce hořlavé a je tedy nutné příslušné bezpečnostní opatření. [15]

Svařování

Při svařování slitiny Ti 6 – 4 je třeba použít metody s inertním ochranným plynem, aby nedocházelo k nárůstu koncentrace kyslíku v místě svaru, což způsobuje křehnutí svaru. Nejběžnější metodou používanou pro svařování této slitiny je pomocí wolframové elektrody v inertní atmosféře (WIG). Svařovat tuto slitinu lze ale také ostatními metodami (plazmovým obloukem, laserovým paprskem, elektronovým paprskem). [15]

Čištění

Po tepelném zpracování a ochlazení na vzduchu, je mimořádně důležité, aby se zcela odstranily nejen nečistoty na povrchu, ale také základní vrstva křehké alfa fáze. Toto odstranění může být provedeno mechanickými prostředky, jako je broušení nebo obrábění. Stejně tak je důležité odstranit vodní kámen, a to za použití roztavené soli nebo abraze. Dále je možné použít moření ve směsi kyseliny dusičné a fluorovodíkové. [15]

7. Závěr

Hlavním cílem práce bylo vypracování rešerše na dané téma, kterým bylo materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc a jejich charakteristiky ve vztahu na výrobní procesy.

Abychom dokázali příslušný materiál efektivně využívat, potřebujeme k takovému rozhodování detailně poznat jeho základní charakteristiky. Číselné hodnoty těchto charakteristik pomáhají kvantifikovat kvalitativní vlastnosti materiálů. Základní vlastností materiálů se rozdělují do tří základních skupin. Fyzikální, mechanické, technologické a chemické.

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení kovu. Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. V některých případech dochází při tepelném zpracování k dalším pozitivním efektům. Průběh tepelného zpracování je u všech způsobů a u všech kovových materiálů v podstatě stejný. Skládá se z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě (prohřátí, prohřev) a následném ochlazení, přičemž se tento postup může i vícekrát opakovat.

Chemické složení materiálů je jedna ze základních věcí, která určuje charakter daného materiálu. Mnoho slitin je legováno různými prvky, aby došlo ke zlepšení jejich vlastností. Například u nerezových ocelí se využívá chrom ke zlepšení odolnosti proti korozi. Chemické složení hliníkových slitin rozhoduje, zda je slitina vhodná ke tváření nebo ke slévání. Přísadové prvky v titanových slitinách ovlivňují tvorbu struktury α (Al, O, N, C) a struktury β (V, Nb, Mo, Ta).

V HAO se ve výrobních procesech používají oceli, slitiny hliníku, kobaltu niklu a titanu. V této práci byl vybrán jeden materiál z každé skupiny a následně charakterizován ve vztahu na výrobní procesy. Cílem bylo určit jak jeho vlastností ovlivňují především tvářitelnost, obrobitelnost a svařitelnost.

8. Seznam literatury

- [1] BEŇO, Luděk a Martin BUGAJ. *Materiály v letectví*. Vyd. 1. Žilina: Žilinská univerzita, 2002, 167s.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [3] LEYENS, Ch., PETERS, M. *Titanium and titanium alloys*. Weinheim: WILEY-VCH, 2003. 513 s.
- [4] http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [6] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [7] USTOHAL, Vladislav *Letecké materiály*. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1988. 130 s.
- [8] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2006. 185 s.
- [9] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: speciální kovové materiály*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1.
- [10] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. Vyd. 2., přeprac. Praha: SNTL, 1977.
- [11] <http://www.makeitfrom.com/material-properties/2024-O-Aluminum/>
- [12] http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/17-4_ph_data_sheet.pdf
- [13] D. KLOOP, William. *Aerospace And High performance Alloys database*. © 2015 by CINDAS, LLC, West Lafayette, Indiana 47906.
- [14] *Aerospace And High performance Alloys database*. © 2015 by CINDAS, LLC, West Lafayette, Indiana 47906.
- [15] <http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269>
- [16] <http://www.rtiintl.com/Titanium/RTI-Titanium-Alloy-Guide.pdf>

9. Seznam obrázků

Obr. 1 procentuální zastoupení materiálu na letounu, vlevo v draku dopravního letadla, vpravo na proudovém motoru	10
Obr. 2 Základní druhy namáhání při vnějším zatížení.....	13
Obr. 3 Základní princip tepelného zpracování kovů.....	17
Obr. 4 Rovnovážný diagram soustavy železo - uhlík	21
Obr. 5 Precipitáty zpevňující fáze γ' v niklové žárovevné slitině, extrační replika	24
Obr. 6 Vliv přísadových a příměsových prvků na teplotu polymorfní přeměny ve slitinách titanu.....	25
Obr. 7 Hlavní morfologické typy struktur slitin $\alpha + \beta$ v žíhaném stavu.....	26
Obr. 8 Mikrostruktura slitiny HAYNESS 188 v žíhaním stavu	35
Obr. 9 Mikrostruktura slitiny Ti 6 – 4 (788 °C/15 min.: ochlazeno na vzduchu) žíhaný stav	40
Obr. 10 Slitina Ti 6 – 4 (1016 °C/20 min.: Ochlazeno na vzduchu) struktura β	41

10. Seznam grafů

Graf 1 Tepelná vodivost některých materiálů – relativní parametr porovnání se stříbrem.....	13
Graf 2 Křivky napětí – deformace pro Inconel 718 po tepelném zpracování.....	32
Graf 3 Typické křivky napětí – deformace pro plech namáhaný v příčném směru za pokojových a zvýšených teplot.....	36

11. Seznam tabulek

Tab. 1 Přibližné hodnoty meze pevnosti v tahu za zvýšené teploty	27
Tab. 2 Chemické složení slitiny Hliník 2024	28
Tab. 3 Standardní tepelná zpracování pro ocel 17 – 4 PH.....	30
Tab. 4 Chemické složení oceli 17 – 14 PH.....	31
Tab. 5 Chemické složení slitiny Inconel 718.....	33
Tab. 6 Chemické složení slitiny HAYNESS 188	37
Tab. 7 Chemické složení slitiny Ti 6 - 4.....	40